



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Zoran Domitran, dipl. ing.

UTJECAJ ODSUPANJA DIMENZIJA NA ŽIVOTNI VIJEK POLIMERNIH ZUPČANIKA

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2013.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL
ARCHITECTURE

Zoran Domitran, mag. ing. mech

INVESTIGATION OF DIMENSIONAL TOLERANCES ON THE POLYMER GEAR LIFE

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2013.



Sveučilište u Zagrebu

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Zoran Domitran, dipl. ing.

UTJECAJ ODSUPANJA DIMENZIJA NA ŽIVOTNI VIJEK POLIMERNIH ZUPČANIKA

DOKTORSKI RAD

Mentor:
Prof. dr. sc. Milan Opalić

Zagreb, 2013.



University of Zagreb

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND NAVAL
ARCHITECTURE

Zoran Domitran, mag. ing. mech

INVESTIGATION OF DIMENSIONAL TOLERANCES ON THE POLYMER GEAR LIFE

DOCTORAL THESIS

Supervisor:
Prof. dr. sc. Milan Opalić

Zagreb, 2013.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

UDK:	678.7:621.833
Ključne riječi:	polimeri, zupčanici, granica opteretivosti, temperatura, buka, apsorpcija vode, bočna zračnost
Znanstveno područje:	Tehničke znanosti
Znanstveno polje:	Strojarstvo
Institucija u kojoj je rad izrađen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje (FSB), Zagreb
Mentor rada:	prof. dr. sc. Milan Opalić
Broj stranica:	138
Broj slika:	96
Broj tablica:	30
Broj korištenih bibliografskih jedinica:	93
Datum obrane:	listopad, 2013.
Povjerenstvo:	dr. sc. Mladen Šercer, red. prof. – predsjednik dr. sc. Milan Opalić, red. prof. – mentor dr. sc. Vinko Ivušić, red. prof. – član dr. sc. Tatjana Haramina, doc. – član dr. sc. Jože Flašker, red. prof. Fakulteta za strojništvo, Maribor – član
Institucija u kojoj je rad pohranjen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje (FSB), Zagreb Nacionalna i sveučilišna knjižnica, Zagreb

Zahvaljujem mentoru, prof. dr. sc. Milanu Opaliću, na kritičkom pristupu i pomoći koju mi je pružio tijekom istraživanja, provedbe pokusa i izrade ovoga rada, kao i članovima povjerenstva prof. dr. sc. Mladenu Šerceru, prof. dr. sc. Jožetu Flaškeru, prof. dr. sc. Vinku Ivušiću te doc. dr. sc. Tatjani Haramini. Također zahvaljujem djelatnicima Katedre za elemente strojeve i konstrukcija te djelatnicima Katedre za alatne strojeve FSB-a u Zagrebu na pruženoj pomoći i razumijevanju.

Veliku zahvalnost dugujem svojim kolegama i prijateljima dr. sc. Tomislavu Staroveškom, dr. sc. Marku Katiću, dipl. ing. Vedranu Šimunoviću, dr. sc. Nenadu Ferdeljiju, doc. dr. sc. Danku Brezaku, doc. dr. sc. Krešimiru Vučkoviću, dr. sc. Ani Pilipović te gospođi Mariji, na savjetima te korisnim i zanimljivim raspravama koje su uvelike pridonijele izradi rada.

Na kraju veliko hvala mojoj obitelji, ocu Zvonimiru, bratu Miroslavu i Mihaeli na beskrajnoj podršci i strpljenju jer su uvijek bili uz mene tijekom studiranja i pisanja ovog rada.

Ovaj rad posvećujem svojoj pokojnoj majci Zori, za svu brigu, ljubav, odricanje i potporu.

Podaci o mentoru.....	iii
Predgovor	iv
Sažetak	v
Summary	vi
Ključne riječi - Keywords	vii
Popis slika	viii
Popis tablica	xi
Popis oznaka.....	xii
Popis kratica	xvi
1 Uvod.....	1
1.1 Motivacija za istraživanje.....	2
1.2 Pregled dosadašnjih istraživanja.....	3
1.3 Hipoteza rada.....	10
1.4 Očekivani znanstveni doprinos.....	10
1.5 Struktura rada	11
2 Polimerni materijali u proizvodnji zupčanika	12
2.1 Fizička stanja polimera.....	13
2.2 Poliamidi.....	14
2.2.1 Apsorpcija vode kod poliamida.....	15
2.2.2 Kondicioniranje poliamida	17
2.2.3 Viskoelastičnost	19
2.3 Mehanička svojstva poliamida	21
3 Kvaliteta izrade polimernih zupčanika.....	25
3.1 Klasifikacija zupčanika prema DIN 3961	25
3.2 Utjecaj načina izrade i materijala na kvalitetu zupčanika	27
3.3 Bočna zračnost prema DIN 3967.....	30
3.4 Bočna zračnost kod polimernih zupčanika.....	33
3.4.1 Utjecaj temperature na bočnu zračnost	33
3.4.2 Utjecaj vlage na bočnu zračnost.....	35
3.4.3 Deformacija zuba i utjecaj na bočnu zračnost.....	36
3.5 Bočna zračnost prema funkciji polimernih zupčanika	37
3.5.1 Prijenos gibanja	37

3.5.2	Prijenos snage i okretnog momenta	38
4	Eksperimentalno ispitno postolje i mjerna oprema	39
4.1	Ispitno postolje	40
4.1.1	Ispitni i pomoćni zupčani prijenosnici	42
4.1.2	Pogon ispitnog postolja	45
4.2	Mjerni sustav	48
5	Mjerenje i analiza rezultata	53
5.1	Koncipiranje eksperimenta	53
5.2	Planiranje pokusa	54
5.2.1	Određivanje područja varijacije	56
5.3	Parametri pokusa	64
5.3.1	Ispitni zupčanici	65
5.3.2	Kriteriji zadovoljavanja radnog vijeka polimernih zupčanika	67
5.3.3	Ciklička ograničenja mjerenja	71
5.3.4	Određivanje tvrdoće	72
5.4	Ovisnost promjene mase o radnim parametrima	74
5.4.1	Predloženi model promjene masa zupčanika od poliamida (PA 6)	77
5.5	Ovisnosti ulaznih veličina na ostvareni broj ciklusa polimernih zupčanika	78
5.5.1	Predloženi model očekivanog broja ciklusa za zupčanike od PA 6	82
5.6	Utjecaj radnih stanja na srednju temperaturu boka zuba polimernih zupčanika	85
5.6.1	Predloženi model određivanja srednje temperature zahvata boka zuba	90
5.7	Utjecaj radnih stanja na povećanje buke i mirnoće prijenosa	93
5.7.1	Predloženi model određivanja promjene buke	95
5.8	Ovisnosti radnih parametara pokusa o zadovoljavanju radnih uvjeta	97
5.8.1	Energija spektra u ovisnosti o radnim parametrima	100
5.9	Opteretivost polimernih zupčanika u ovisnosti o različitim brzinama vrtnje	105
5.10	Analiza rezultata	107
5.11	Kritika vlastitog rada i smjerovi budućih istraživanja	109
6	Zaključak	110
7	Literatura	112
	Kratki životopis	118
	Short Biography	119

Milan Opalić rođen je 2. listopada 1949. u Gornjoj Pastuši, općina Petrinja. Osnovnu školu pohađao je u Petrinji. Srednju školu završio je u Karlovcu 1968. godine. Iste godine upisao je Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, konstrukcijski odjel. Diplomirao je 1974. godine. Kraće vrijeme radio je u tvrtki "Overbeck", Herborn, u Njemačkoj, u proizvodnji alatnih strojeva. Tijekom studija obavljao je dužnosti demonstratora na predmetima "Fizika" (Elektrotehnički Fakultet) i "Elementi strojeva" (Fakultet strojarstva i brodogradnje). Godine 1975. izabran je na radno mjesto asistenta te je upisao postdiplomski studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, a 1980. godine obranio je magistarski rad pod naslovom "Istraživanje utjecaja materijala na opteretivost pužnih prijenosnika". Doktorirao je 1984. godine disertacijom s naslovom "Prilog istraživanju opteretivosti bokova pužnih kola pužnih prijenosnika". Godine 1984. izabran je u znanstveno zvanje znanstveni suradnik, te radno mjesto docenta na Katedri za elemente strojeva i konstrukcija FSB, a 1989. u znanstveno zvanje viši znanstveni suradnik te radno mjesto izvanredni profesor na toj Katedri. 14. ožujka 2000. godine izabran je u znanstveno zvanje znanstveni savjetnik, te radno mjesto redovitog profesora na Katedri za elemente strojeva i konstrukcija, u Zavodu za konstruiranje FSB-a. Znanstvena aktivnost vezana je uz područje konstruiranja i elemenata strojeva, a posebno u području prijenosa snage i gibanja. Pod njegovim mentorstvom obranjeno je 20 magistarskih radova i disertacija na više sveučilišta u zemlji i inozemstvu. U dodiplomskoj i poslijediplomskoj nastavi nositelj je nekoliko temeljnih kolegija, od kojih je neke i osnovao. Stručna aktivnost povezana je za mehaničke konstrukcije općenito, što je rezultiralo nizom stručnih projekata od kojih je većina i izvedena. Autor je i mnogih laboratorijskih uređaja na kojima je znanstvene radove radilo niz znanstvenika. Autor je više od pedeset znanstvenih i stručnih radova, te pet sveučilišnih udžbenika. Bio je voditelj sedam znanstvenih projekata. Član je više domaćih i inozemnih stručnih asocijacija.

Zbog svoje niske cijene polimerni materijali u proizvodnji konstrukcijskih sklopova postaju važan segment. Primjenjivost polimernih materijala u proizvodnji zupčanika posebice dolazi do izražaja kod snižavanja troškova proizvodnje te kod specijalnih primjena, gdje uporaba metalnih zupčanika nije moguća. Relativno niski troškovi proizvodnje kod visokih serija polimernih zupčanika nasuprot metalnih zupčanika, dodatno povisuju nastojanja proizvođača za proširivanjem saznanja o projektiranju takvih zupčanih parova. Nedostatak iskustvenih vrijednosti u primjeni polimernih materijala kod projektiranja polimernih zupčanika, uz relativno slabu pokrivenost područja odgovarajućim normama otvaraju mnoga neriješena pitanja.

Radi velike raznolikosti polimernih materijala postavlja se pitanje primjenjivosti različitih kombinacija polimernih materijala u zahvatu, odnosno kakav je utjecaj pojedinog materijala na radni vijek zupčanika i kvalitetu rada. Primjenom konstrukcijskih polimera smanjuje se paleta primjenjivih materijala koja je još uvijek velika i ovisi ponajprije od primjene. Izbor materijala ovisi o mehaničkim zahtjevima i stabilnosti dimenzija u različitim medijima koji moraju zadovoljiti odabrani materijali. Važan parametar u izradi zupčanika je točnost izrade polimernih zupčanika, koja ovisi vrlo često o odabranim postupcima izrade i vrste odabranog materijala, odnosno vrsti ojačala osnovnom materijalu. Izbor odgovarajućeg materijala vrlo često je stvar kompromisa između mehaničkih svojstava i točnosti izrade.

Promjena temperature i relativne vlažnosti zraka tijekom radnog vijeka zupčanika vrlo često nije u praksi predvidljiva. Polimerni materijali za razliku od metala pokazuju mnogo veću ovisnost o temperaturi i vlažnosti zraka što se ponajprije, odnosi na njihova mehanička svojstva. Istraživanja su pokazala da osim mehaničkih karakteristika dolazi i do geometrijskih promjena na zupčanicu.

Istraživanje provedeno u ovom radu vođeno je s namjerom podizanja iskustvenih saznanja o ponašanju polimernih zupčanika u realnim radnim uvjetima, s ciljem proširivanja područja uporabe polimernih zupčanika. Poznavanje granica opteretivosti te najutjecajnijih ulaznih parametara bio bi dobar temelj za daljnja istraživanja što bi dovelo do pouzdanijeg projektiranja zupčanika od polimernih materijala.

Polimerni zupčanci zbog ekonomski prihvatljive izrade postaju važan segment u prijenosu snage i gibanja. Životni vijek polimernih zupčanika većim je dijelom uvjetovan njihovim geometrijskim karakteristikama i svojstvima materijala, čiji međusobni utjecaji do danas nisu dovoljno istraženi. Stoga je u ovom radu provedeno istraživanje utjecaja pomaka profila, opterećenja te stanja materijala na radni vijek polimernih zupčanika i kvalitetu rada prijenosnika. Svi zupčanci u istraživanju rađeni su od poliamida. Provedena je klasifikacija osnovnih svojstava polimera s naglaskom utjecaja vode na mehanička svojstva poliamida. U radu su također analizirani načini izrade i utjecaj bočne zračnosti u interakciji s promjenom sadržaja vode u poliamidu. Potom su dane smjernice za izračun bočne zračnosti prema funkciji prijenosnika. Dan je prikaz eksperimentalnog uređaja sa zatvorenim tokom snage za ispitivanje polimernih zupčanika bez maziva, s mogućnošću mjerenja srednje temperature na izlazu boka zuba i zahvata. Prikazom rezultata eksperimentalnih istraživanja potvrđen je utjecaj temperature na radni vijek polimernih zupčanika. Dane su matematičke formulacije za izračun očekivane srednje temperature bokova zuba, gubitak mase te očekivani ostvareni broj radnih ciklusa do kolapsa zupčanika prema ulaznim parametrima (opterećenje, pomak profila i stupanj zasićenosti). Klasifikacijom uvjeta zadovoljavanja radnog vijeka zupčanika prikazane su očekivane tendencije promjene buke i kvalitete rada polimernih zupčanika prema ulaznim parametrima. Postavljene su granice opteretivosti prema toplinskom zaribavanju zupčanika od poliamida 6 prema definiranim uvjetima za područje brzina vrtnje od 1000 do 2100 min⁻¹ kod zupčanika u kombinaciji materijala poliamid/poliamid za rad bez maziva.

Polymer spur gear based transmission systems are becoming increasingly important due to economically acceptable production costs. Life of such gears is highly dependent on the mechanical loads in interaction with geometrical and material properties, which is not yet sufficiently investigated. Therefore, the main goal of this research was to establish the effects of profile shift, torque and different material conditions on the polymer (polyamide PA 6) gear life. In addition, the effects of various production methods as well as the effects of backlash in interaction with water content in polymer have also been investigated. Experimental part of research was done on testbed with locked gear train power transmission system capable of measuring temperatures in close proximity to the gear mesh. Mathematical models based on experimental results have been suggested for estimation of mean temperatures in gear mesh, loss of mass under different working conditions and expected number of cycles. Basic polymer properties have been classified with emphasis on the effects of water on their mechanical properties. Recommendations for backlash calculation with respect to the transmission system application have also been provided. Trends of noise and quality of transmission operation have also been investigated with respect to the working conditions and conditions for the end of gear life. Finally, thermal failure boundaries for polyamide gear pairs without lubrication have been established under different working conditions.

Ključne riječi - Keywords

- polimeri
- zupčanici
- granica opteretivosti
- temperatura
- buka
- apsorpcija vode
- bočna zračnost

- polymers
- gears
- load capacity
- temperature
- acoustic noise
- water absorption
- backlash

Slika 2.1 Strukture plastomera [60].....	13
Slika 2.2 Termomehanička krivulja polimera [60]	14
Slika 2.3 Kemijska struktura PA 6 [61]	14
Slika 2.4 Utjecaj relativne vlažnosti na apsorpciju vode kod poliamida [30].....	15
Slika 2.5 Apsorpcija vode u poliamidu [30]	16
Slika 2.6 Apsorpcija vode PA 6 za različite debljine ispitnih tijela, dimenzije 120 x 20 mm [30] ...	16
Slika 2.7 Vrijeme kondicioniranja poliamida PA 6 [56].....	17
Slika 2.8 Distribucija vlage po debljini stjenke, debljine 18 mm kod PA 6, tijekom tri godine uporabe u vodi [56].....	18
Slika 2.9 Viskoelastičnost polimernih materijala [5]	20
Slika 2.10 Burgerov reološki model [5, 56]	20
Slika 2.11 Naprezanje i deformacije poliamida PA 66 pri različitim temperaturama [56].....	21
Slika 2.12 Dijagram: a) Deformacija i naprezanje, b) Modul rastezljivosti za PA 6 [56]	21
Slika 2.13 Dijagram ovisnosti naprezanja o deformaciji pri različitim temperaturama za PA 6 (DAM) [61].....	22
Slika 2.14 Upojnost vode prema relativnoj vlažnosti okoline za neke vrste poliamida PA [61].....	22
Slika 2.15 Ovisnost modula rastezljivosti za različite vrste poliamida PA 6 u zavisnosti od temperature [61].....	23
Slika 2.16 Modul rastezljivosti u zavisnosti od temperature [61].....	23
Slika 2.17 Rastezna čvrstoća poliamida PA 6 u zavisnosti o udjelu vode u materijalu [61]	24
Slika 3.1 Skupljanje poliamida PA 6 u zavisnosti od debljine stjenke: a) bez staklenih vlakana, b) 30% staklenih vlakna [49]	28
Slika 3.2 Linije spajanja kod injekcijskog prešanja [47]	28
Slika 3.3 Simulacija usmjerenosti vlakana kod tri ušća tijekom injekcijskog prešanja [46]	29
Slika 3.4 Odstupanje temeljnog koraka zuba - f_p kod zupčanika od PA 66 [47].....	29
Slika 3.5 Radikalno odstupanje ozubljenja F_r , PA 66 [46]	30
Slika 3.6 Kružna zračnost.....	31
Slika 3.7 Koeficijenti linearnog toplinskog širenja za poliamid PA6 kod različitih sadržaja vlakana i linija tečenja materijala u zavisnosti od temperature [61]	33
Slika 3.8 Odstupanje profila boka zuba pri različitim temperaturama [69]	34
Slika 3.9 Promjena dimenzije u ovisnosti od udjela vode u materijalu PA 66 [61].....	35
Slika 3.10 Promjena dimenzije prema promjeni vlažnosti zraka kod poliamida PA 66 s 33% udjela vlakana [61]	35
Slika 4.1 Ispitni postav primijenjen u eksperimentalnom dijelu istraživanja	39
Slika 4.2 Postolje za ispitivanje granica opteretivost i trošenja polimernih zupčanika	41
Slika 4.3 Shema postolja za ispitivanje polimernih zupčanika	41
Slika 4.4 Shema cirkulacije snage kod uređaja s mehaničkim zatvorenim tokom snage	42
Slika 4.5 Crteži pomoćnih zupčanika izrađenih od čelika 34CrNiMo6.....	44
Slika 4.6 Pomoćni prijenosnik, montaža zupčanika.....	44
Slika 4.7 Ispitni prijenosnik	45
Slika 4.8 Sinkroni servomotor <i>APM-SE15A</i> i pripadajuća karakteristika.....	46
Slika 4.9 Servo regulator <i>DPRAHIE-030A400</i>	47
Slika 4.10 Struktura mjernog sustava.....	48

Slika 4.11 Mjerač torzijskih vibracija BD 5.....	50
Slika 4.12 Bez kontakti termometar CT P7 (Optris).....	50
Slika 4.13 Smještaj termometra CT P7	51
Slika 4.14 Izvedba senzora za mjerenje temperature okoliša i temperature kućišta	51
Slika 4.15 Položaj senzora HD 8701	52
Slika 5.1 Centralno kompozitni plan pokusa za tri faktora	55
Slika 5.2 Izbor područja varijacija parametara.....	56
Slika 5.3 Izbor područja varijacija parametara x_2 i x_3	57
Slika 5.4 Koncentracija vode poliamida PA 6 prema debljini stjenke	58
Slika 5.5 Koncentracija vode u poliamida PA 6 za debljinu stjenke 8,25 mm	59
Slika 5.6 Određivanje vremena pada mase za poliamid PA 6 dimenzija ispitnih tijela 30 x 30 x 20 mm	60
Slika 5.7 Vaga za mjerenje mase PRJ 1200-3N proizvođača <i>Kern & Sohn GmbH</i>	61
Slika 5.8 Varijacija optimalnih brzina klizanja, pomak profila J_1	62
Slika 5.9 Varijacija prema maksimalnoj podrezanosti zupčanika $z = 23$ zuba, pomak profila J_2	62
Slika 5.10 Varijacija prema maksimalnoj podrezanosti zupčanika, $z = 27$ zuba, pomak profila J_3	63
Slika 5.11 Crtež ispitnih zupčanika prema varijaciji pomaka J_1	67
Slika 5.12 Savojno naprezanje kod zupčanika od poliamida PA 66, za nepodmazivane zupčanike, modul $m = 3$ mm u sprezi s metalnim zupčanicima	68
Slika 5.13 Povećanje otpora u sustavu ispitnog postolja kao rezultat zaribavanja polimernih zupčanika	68
Slika 5.14 Pojednostavnjena slika smanjenja debljine zuba, porastom istrošenosti	69
Slika 5.15 Određivanje istrošenosti zuba	70
Slika 5.16 Ciklusi provedbe ispitivanja: a) manji zupčanik, b) veći zupčanik	71
Slika 5.17 Durometar i izgled igle za mjerenje prema Shore-u D [92].....	72
Slika 5.18 Kalibracijski uređaj za durometre prema Shore-u D	72
Slika 5.19 Papir vjerojatnosti ostataka po normalnoj razdiobi predloženog modela	75
Slika 5.20 Kolmogorov – Smirnov i χ^2 test provjere normalnosti ostataka modela.....	75
Slika 5.21 Grafički prikaz promjene razlika masa u ovisnosti opterećenja i vlage	77
Slika 5.22 Grafički prikaz promjene razlika masa u ovisnosti o pomaku profila i vlazi	78
Slika 5.23 Papir vjerojatnosti ostataka prema normalnoj razdiobi predloženog modela ostvarenog broja ciklusa	79
Slika 5.24 Kolmogorov – Smirnov i χ^2 test provjere normalnosti ostataka modela ostvarenog broja ciklusa	79
Slika 5.25 Graf ostataka kao funkcija rednog broja izvođenja pokusa za model ostvarenog broja ciklusa	80
Slika 5.26 Prostorni prikaz rezultata pokusa za ostvoreni broj ciklusa	82
Slika 5.27 Grafički prikaz rezultata za ostvoreni broj ciklusa kod pomaka profila J_1	83
Slika 5.28 Utjecaj opterećenja na ostvoreni broj ciklusa kod zasićenosti materijala 50%.....	84
Slika 5.29 Utjecaj opterećenja na ostvoreni broj ciklusa kod zasićenosti materijala 100%.....	84
Slika 5.30 Utjecaj opterećenja na ostvoreni broj ciklusa kod različitih zasićenosti materijala.....	84
Slika 5.31 Promjena temperature tijekom radnog vijeka rada kod toplinskog zaribavanja, $T = 25$ Nm, $n = 1000 \text{ min}^{-1}$	86

Slika 5.32 Toplinsko zaribavanje polimernih zupčanika gonjenog i pogonskog zupčanika, bok zuba nakon zadovoljavanja radnog uvjeta.....	86
Slika 5.33 Papir vjerojatnosti ostataka po normalnoj razdiobi predloženog modela za srednju temperaturu boka zuba.....	88
Slika 5.34 Kolmogorov – Smirnov i χ^2 test provjere normalnosti ostataka modela za srednju temperaturu boka zuba.....	88
Slika 5.35 Srednja temperatura boka prema ostvarenom broju ciklusa za stalni pogon za opterećenja u rasponu od 20 Nm do 30 Nm.....	90
Slika 5.36 Grafički prikaz modela maksimalnih srednjih temperatura boka zuba.....	91
Slika 5.37 Intenzivno trošenje zuba pri $T = 25$ Nm, J_1 : a) prije, b) nakon ostvarenog radnog vijeka	92
Slika 5.38 Očekivane srednje temperature boka zuba za ispitni raspon opterećenja kod karakterističnih zasićenost poliamida PA 6	92
Slika 5.39 Očekivane srednje temperature boka zuba za različitu zasićenost poliamida PA 6 kod 20, 25 i 30 Nm	92
Slika 5.40 Vjerodostojnost ostataka i statistički testovi: a) Papir vjerojatnosti ostataka modela te Kolmogorov – Smirnov test (K–S test) i provjera varijance χ^2 prema normalnoj razdiobi predloženog modela	93
Slika 5.41 Grafički prikaz modela promjene buke u odnosu na početak i sredinu radnog vijeka: a) 100%-tna zasićenost materijala vodom; b) 50%-tna zasićenosti materijala vodom; c) 0%-tna zasićenosti materijala vodom	96
Slika 5.42 Ovisnost promjene razine buka o pomaku profila za određena ispitna opterećenja	96
Slika 5.43 Ovisnost promjene razine buke o postotku zasićenosti materijala za određena ispitna opterećenja	97
Slika 5.44 Pukotina na polimernom zupčaniku.....	98
Slika 5.45 Raspored srednjih temperatura boka zuba i momenta otpora sustava tijekom radnog vijeka zupčanika uz opterećenje $T = 20$ Nm pri pomaku profila J_2 i brzini vrtnje $n = 1000 \text{ min}^{-1}$	98
Slika 5.46 Tendencija promjene momenta otpora u sustavu naspram promjene srednje temperature boka zuba	99
Slika 5.47 Srednji momenti otpora uređaja tijekom radnog vijeka zupčanika.....	99
Slika 5.48 Izgled boka zuba zupčanika nakon $3 \cdot 10^6$ ciklusa, $T = 20$ Nm, $n = 1000 \text{ min}^{-1}$: a) bok zuba, b) uvećanje boka zuba	100
Slika 5.49 Trganje slojeva materijala na boku zuba nakon 40 h rada, $T = 20$ Nm, $n = 1000 \text{ min}^{-1}$	100
Slika 5.50 FFT analiza nefiltriranog signala	102
Slika 5.51 FFT analiza filtriranog signala	102
Slika 5.52 Signal prije obrade FFT analizom.....	103
Slika 5.53 Energija spektra, $T = 25$ Nm, pomak profila J_1 , brzina vrtnje $n = 1000 \text{ min}^{-1}$	104
Slika 5.54 Opteretivost zupčanika od PA 6 kod različitih brzina vrtnje	106
Slika 5.55 Ovisnost odnosa obodne sile i širine zupčanika od PA 6 kod različitih obodnih brzina	106

Tablica 2.1 Apsorpcija vode za neke vrste poliamida prema ISO 62 [56].....	18
Tablica 3.1 Podjela kvalitete zupčanika prema skupinama primjene [64].....	26
Tablica 3.2 Testni postupci za geometrijska odstupanja zupčanika [64].....	27
Tablica 3.3 Stezanje različitih vrsta poliamida PA6 [49].....	28
Tablica 3.4 Promjena dimenzije prema zasićenosti PA 66 i POM polimera	36
Tablica 4.1 Podaci o zupčanom paru pomoćnog prijenosnika (duljine u mm).....	43
Tablica 4.2 Osnovni tehnički podaci odabranog pogonskog motora	46
Tablica 4.3 Tehničke karakteristike ulazno - izlaznog sučelja servo regulatora.....	47
Tablica 4.4 Popis veličina i mjernih sustava kod provođenja eksperimenta.....	49
Tablica 5.1 Prikaz povećanja mase nakon kondicioniranja za ispitna tijela debljine 25 i 20 mm	59
Tablica 5.2 Prikaz smanjenja mase nakon sušenja za ispitna tijela debljine 25 i 20 mm	61
Tablica 5.3 Faktori i njihove razine	64
Tablica 5.4 Plan pokusa	64
Tablica 5.5 Podaci o varijacijama manjeg zupčanika (duljine u mm)	65
Tablica 5.6 Podaci o varijacijama većeg zupčanika (duljine u mm).....	66
Tablica 5.7 Promjena tvrdoće ispitnih zupčanika tijekom provedbe eksperimenta.....	73
Tablica 5.8 Rezultati promjena mase i broja ciklusa za različita stanja pokusa	74
Tablica 5.9 Analiza varijance rezultata razlike masa	76
Tablica 5.10 Analiza varijance rezultata ostvarenog broja ciklusa	81
Tablica 5.11 Konstante modela ostvarenog broja ciklusa.....	82
Tablica 5.12 Srednje temperature zahvata za opterećenje $T = 20$ Nm tijekom rada zupčanika.....	87
Tablica 5.13 Rezultati srednjih temperatura boka zuba i promjene buke tijekom rada	87
Tablica 5.14 Analiza varijance rezultata srednjih temperatura boka zuba.....	89
Tablica 5.15 Konstante modela srednje temperature zahvata boka zuba.....	90
Tablica 5.16 Analiza varijance rezultata promjene buke tijekom radnog vijeka zupčanika	94
Tablica 5.17 Konstante modela promjene buke tijekom rada zupčanika.....	95
Tablica 5.18 Karakteristične frekvencije ispitnog zupčanika	101
Tablica 5.19 Trend promjene energije sustava za opterećenje $T = 20$ Nm	103
Tablica 5.20 Trend promjene energije sustava za opterećenje $T = 25$ Nm	104
Tablica 5.21 Rezultati provedbe testa opteretivosti na različitim brzinama vrtnje.....	105

Oznaka	Jedinica	Opis
a	mm	osni razmak
A_a	mm	odstupanje osnovog razmaka
A_k	m ²	površina kućišta
$A_{sn\ 1}$	μm	dopušteno odstupanje mjere preko zuba za zupčanik 1
$A_{sn\ 2}$	μm	dopušteno odstupanje mjere preko zuba za zupčanik 2
A_x	mm	odstupanje određenog funkcijskog elementa prijenosa
b	mm	širina zupčanika
$b_0, \dots b_k$	-	koeficijenti
c	-	koncentracija difundirajućeg medija na mjestu x
C_{gr}	N/mm ²	značajaka čvrstoće materijala kod savijanja korijena zuba
C_s	%	koncentracija zasićenja
C_t	%	koncentracija vode u materijalu prema vremenu apsorpcije
c_v	%	apsorpcija vode
d	mm	diobeni promjer
D	cm ² /s	koeficijent difuzije
d_a	mm	promjer tjemene kružnice
d_b	mm	promjer temeljne kružnice
d_f	mm	promjer podnožne kružnice
d_r	mm	promjer valjka/kuglice
d_w	mm	promjer kinematske kružnice
f	Hz	frekvencija snimanja
f_c	Hz	frekvencija filtriranje signala
f_d	Hz	donja granica frekvencijskog spektra
F_f	μm	odstupanje profila zuba
f_g	Hz	gornja granica frekvencijskog spektra
f_i'	μm	pojedinačno tangencijalno odstupanje sprežanjem
F_i'	μm	ukupno tangencijalno odstupanje sprežanjem
F_i''	μm	ukupno radijalno odstupanje sprežanjem
f_k	mm	odstupanje elastičnost zuba
F_k	N	sila zbog mase kućišta
F_{Nt}	N	nazivno linijsko opterećenje
f_p	μm	pojedinačna odstupanja koraka
F_p	μm	ukupno odstupanje lučne duljine koraka
f_{pe}	μm	odstupanje normalnog koraka zuba
F_r	μm	radijalno odstupanje ozubljenja
F_t	N	nazivna obodna sila na diobenom promjeru
f_{z1}	Hz	frekvencija vratila manjeg zupčanika
f_{z2}	Hz	frekvencija vratila većeg zupčanika
f_{zah}	Hz	frekvencija zubi u zahvatu
F_β	μm	odstupanje pravca bočne linije
$f_{\Sigma\beta}$	μm	ukupno odstupanje od paralelnosti na dužini L_G

Oznaka	Jedinica	Opis
G	N/mm	modul smičnosti
G	N	sila zbog mase utega
h_t	mm	visina zuba
i	-	prijenosni odnos
I	-	tijek difuzije
J_1	-	kombinacija pomaka profila $x_1 = 0,0849$, $x_2 = -0,0849$ mm
J_2	-	kombinacija pomaka profila $x_1 = 0,2956$, $x_2 = -0,2956$ mm
J_3	-	kombinacija pomaka profila $x_1 = -0,2272$, $x_2 = 0,2272$ mm
j_{\min}	μm	minimalna zračnost
j_p	mm	profilna zračnost
j_r	mm	radijalna zračnost
j_t	mm	kružna zračnost
K_a	-	empirički faktor podmazivanja
K_b	-	empirički faktor kućišta
K_M	-	empirički faktor materijala
L	m	dužina poluge od centra oslonca do mase G
L_G	mm	udaljenost do centra ležaja do središta vratila
m	mm	modul
m_1	g	masa prije kondicioniranja
M_1	g	masa prije provedbe ispitivanja i pripreme uzorka
m_2	g	masa nakon kondicioniranja
M_2	g	masa prije provedbe ispitivanja
M_3	g	masa nakon provedbe ispitivanja
M_d	mm	mjera preko valjaka/kuglica
N	-	ostvareni broj ciklusa
n_i	min^{-1}	brzina vrtnje
P_f	-	snaga spektralne komponente frekvencije f
P_T	W	prenesena snaga
P_v	W	snaga potrebna za pokrivanje gubitaka ispitnog kruga
r	m	udaljenost od središta zupčanika do središta uležištenja
R_a	μm	srednje aritmetičko odstupanje profila – mjera hrapavosti površine
R_s	μm	odstupanje debljine zuba
RU1	-	istrošenost zuba ispod granice zašiljenosti
RU2	-	zadovoljavanje $3 \cdot 10^6$ ciklusa
RU3	-	toplinsko zaribavanje
s	mm	debljina zuba na diobenoj kružnici
s'	mm	debljina zuba nakon istrošenja
s_a	mm	minimalna debljina zuba zupčanika
S_B	-	sigurnost korijena
t	s	vrijeme trajanja opterećenja
T_{ambi}	$^{\circ}\text{C}$	temperatura okoline
T_{bulk}	$^{\circ}\text{C}$	temperatura tijela zupčanika

Oznaka	Jedinica	Opis
T_{d1}	shore D	tvrdća na početku tretmana
T_{d3}	shore D	tvrdća prije početka eksperimenta
T_{d3}	shore D	tvrdća na kraju eksperimenta
T_f	°C	temperatura tališta kristalnog dijela strukture (tecište)
T_{flash}	°C	trenutna temperatura dodira boka zuba
T_g	°C	temperatura staklastog prijelaza (staklište)
T_i	Nm	moment uvijanja
T_{i1}''	μm	dopušteno odstupanje pri radijalnoj kontroli sprežanjem s etalon zupčanikom za ispitni zupčanik 1
T_{i2}''	μm	dopušteno odstupanje pri radijalnoj kontroli sprežanjem s etalon zupčanikom za ispitni zupčanik 2
t_r	s	vrijeme retardacije ili vrijeme zadržavanja opterećenja
TRA	μm	površina ležajeva
t_{sflash}	°C	srednja temperatura boka zuba
$T_{surface}$	°C	maksimalna temperatura zupčanika
T_v	Nm	moment gubitaka u ispitnom krugu
W_k	mm	mjera preko zubi
x	mm	pomak profila
z_1	-	broj zubi zupčanika 1
z_2	-	broj zubi zupčanika 2
z_g	-	broj zubi gonjenog zupčanika
z_i	-	broj zubi
z_p	-	broj zubi pogonskog zupčanika
z_w	-	mjerni broj zubi
μ	-	faktor trenja
ε_{∞}	mm	najveća zabilježena deformacija
ε_{el}	mm	energijska deformacija
ε_f	mm	deformacija nastala zbog kristalnog prijelaza
ε_g	mm	deformacija nastala zbog staklastog prijelaza
ε_p	mm	plastična (viskozna) deformacija
ε_r	mm	entropijska viskoelastična deformacija
ε_u	mm	ukupna deformacija
ΣA_{st}	μm	odstupanje mjere preko zupčanika u paru u smjeru tangente na profil
ΣA_{ste}	μm	gornje odstupanje mjere preko zupčanika u paru u smjeru tangente na profil
ΣA_{sti}	μm	donje odstupanje mjere preko zupčanika u paru u smjeru tangente na profil
α	°	kut zahvata, kut zahvatne linije
α_G	/° C	koeficijent linearnog toplinskog širenja kućišta
α_n	°	korigirani kut zahvatne linije
α_t	°	čelni kut zahvatne crte
α_w	°	pogonski kut zahvata

Oznaka	Jedinica	Opis
α_{zi}	/° C	koeficijent linearnog toplinskog širenja zupčanika
β	°	kut nagiba boka zuba
Δb	dB	promjena buke tijekom rada zupčanika
$\Delta_{hy\ isp}$	-	očekivani koeficijent promjene dimenzije zbog promjene vlažnosti zraka
$\Delta_{hy\ max}$	-	maksimalni očekivani koeficijent promjene dimenzije zbog promjene vlažnosti zraka
Δj_a	μm	promjena zračnosti radi pogreške osnovnog razmaka
Δj_B	μm	promjena zračnosti nastala pozicioniranjem
Δj_E	μm	promjena zračnosti nastala zbog elastičnosti zuba
Δj_F	μm	promjena zračnosti radi individualnih odstupanja zupčanika
Δj_Q	μm	promjena zračnosti radi bubrenja materijala
Δj_{Qz}	μm	radijalno odstupanje radi promjene vlažnosti zraka
$\Delta j_{t\ max}$	μm	maksimalna kružna zračnost
$\Delta j_{t\ min}$	μm	minimalna kružna zračnost
Δj_θ	μm	promjena zračnosti uslijed promjene temperature
$\Delta j_{\theta z}$	μm	radijalno odstupanje uslijed promjene temperature
$\Delta j_{\Sigma\beta}$	μm	promjena zračnosti uslijed odstupanja paralelnosti osi
Δm	g	očekivana promjena mase
Δs	mm	smanjenje debljine zuba
$\Delta_{th\ isp}$	-	očekivani koeficijent promjene dimenzije zbog temperature
$\Delta_{th\ max}$	-	maksimalni očekivani koeficijent promjene dimenzije zbog temperature
$\Delta\vartheta_G$	μm	promjena temperature kućišta prema temperaturi od 20 °C
$\Delta\vartheta_{zi}$	μm	promjena temperature zupčanika prema temperaturi od 20 °C
η	-	prigušenje
η_p	-	stupanj iskorištenja ispitnog prijenosnika
ρ_{fp}	mm	polumjer zaobljenja podnožja kružnice
ρ_{fp}	mm	polumjer zaobljenja podnožja ozubnice
τ	N/mm ²	naprezanje
φ_z	-	faktor deformacije zuba
Ψ_1	-	faktor deformacije zuba
Ψ_2	-	faktor deformacije zuba
ψ_f	-	površina ispod krivulje spektralne gustoće snage
ω_{zi}	% rh	relativna promjena apsorpcije vode

Kratica	Opis
AGMA	Udruženje američkih proizvođača zupčanika (<i>American Gear Manufacturers Association</i>)
ASTM	Američko društvo za ispitivanje i materijale (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
BS	Britanske norme (<i>British standard</i>)
C	Ugljik
CCD	Centralno kompozitni pokus (<i>Central composite design</i>)
CCF	Plošno kompozitni pokus (<i>Face Centered composite design</i>)
DAM	Suhi polimer vode bez čestica vode u strukturi (<i>Dry as molded</i>)
DC	Istosmjerna struja (<i>Direct current</i>)
DIN	Njemački institut za norme (<i>German Institute for Standardization</i>)
EP	Epoksid
FFT	Brza Fourierova transformacija (<i>Fast Fourier Transformation</i>)
H	Vodik
HAL	Apstrakcijski sloj (<i>Hardware Abstraction Layer</i>)
HRN	Hrvatske norme
ISO	Međunarodna organizacija za normizaciju (<i>International Organization for Standardization</i>)
J	Kodirani zapis pomaka profila zupčanika u paru
kGy	Grej, jedinica ionizirajućeg zračenja
MoS ₂	Molibden disulfid (<i>Molybdenum disulfide</i>)
N	Dušik
O	Kisik
PA	Poliamid
PA 11	Poliamid na osnovi aminoundekanske kiseline
PA 12	Poliamid na osnovi dodekanske kiseline
PA 46	Poliamid na osnovi politetrametilen adipinske kiseline
PA 6	Poliamid na osnovi ϵ kaprolaktama
PA 610	Poliamid na osnovi heksametilendiamin sebacinske kiseline
PA 66	Poliamid na osnovi heksametilendiamin adipinske kiseline
PA 66/6	Poliamid na osnovi PA 6 i PA 66, kopolimer (ϵ kaprolaktama i heksametilendiamin adipinske kiseline)
PA GF	Poliamid ojačan staklenim česticama ili vlaknima
PAA	Poli(akrilna kiselina)
PBT	Poli(butilen-tereftalat)
PC	Polikarbonat
PEEK	Poli eter-eter-keton
PEST	Poliester
PE-UHMW	Polietilen vrlo visoke molekularne mase

PI	Poliimid
POM	Poli(oksi-metilen)
PPA	Poliftalamid
PPS	Poli(fenilen-sulfid)
PTFE	Poli(tetrafluretilen)
R	Hrapavost materijala
RU	Kodirani zapis radnih parametara zadovoljavanja radnog vijeka
SMPM	Sinkroni motor s permanentnim magnetom (<i>Permanent Magnet Synchronous motor</i>)
TE	Elastoplastomer
VDI	Udruga njemačkih inženjera (<i>Association of German Engineers</i>)
VE	Vinilester

Brzi razvoj novih proizvoda jedan je od glavnih karakteristika modernoga gospodarstva, sa svrhom zadovoljavanja sve viših zahtjeva za učinkovitošću i pouzdanošću proizvoda, da bi ostvarili konkurentnost na tržištu. Proizvođači zupčanih prijenosnika snage i gibanja suočeni su s izazovom smanjivanja troškova proizvodnje zupčanika uz istodobno osiguravanje istih ili viših zahtjeva za pouzdanošću i učinkovitošću. Zupčani prijenosnici kao prijenosnici snage i gibanja, ovisno o aplikaciji, moraju osigurati prijenos opterećenja i gibanja pri što višim brzinama uz istovremeno smanjenje vlastite mase i ostvarivanje što kompaktnije izvedbe. Pojedine aplikacije zahtijevaju vrlo različite uvjete radne okoline koji sužavaju izbor mogućih materijala za izradu zupčanih prijenosnika te time postavljaju dodatne izazove za proizvođače zupčanih prijenosnika dok, s druge strane, porast cijene materijala i energije postaje sve izraženiji problem, koji dodatno otežava konkurentnost proizvođača. Masovnijom proizvodnjom zupčanih prijenosnika, manje zahtjevnog uporabe za potrebe autoindustrije te industrije kućanskih aparata, javlja se potreba za bržom i jeftinijom izradom zupčanih prijenosnika. Pronalaskom sintetskih polimera te razvojem relativno brzih i jeftinijih postupaka prerade polimernih materijala, primjena polimernih materijala za izradu zupčanih prijenosnika raste velikom brzinom. Primjenom polimernih materijala, kod izrade zupčanih prijenosnika, ostvaren je pomak u povećanju konkurentnosti uz istovremeni korak prema ekološki podržanoj proizvodnji. Veliki broj različitih vrsta polimernih materijala otvaraju za proizvođače zupčanih prijenosnika jedno potpuno novo područje. Proširuju proizvodnju prijenosnika tamo gdje primjena metalnih zupčanika nije bila ekonomski i funkcionalno zadovoljavajuća.

Polimerni zupčanik kao osnovni element polimernog zupčanog prijenosnika podvrgnut je tijekom eksploatacije specifičnom opterećenju. Korijen zuba polimernog zupčanika opterećen je savojno, dok je bok zuba opterećen visokim kontaktnim pritiscima koji su često, glavni uzrok prestanka rada polimernih zupčanih prijenosnika. Okretanjem zupčanika tijekom rada, specifični kontaktni pritisci ciklički se ponavljaju učestalim ulaskom zuba u zahvat te izazivaju trošenje boka zuba, kad je vanjski okretni moment konstantan. Umorom materijala dolazi do pojave oštećenja na bokovima polimernih zupčanika. Zbog velikog broja polimernih materijala pogodnih za izradu polimernih zupčanika te varijacijom određenih parametara proizvodnje, pokazalo se da utjecaj umora materijala na radni vijek polimernih zupčanika nije isti za sve materijale. Isto tako, promjenom radnih uvjeta polimerni materijali zbog svoje strukture i niže čvrstoće u usporedbi s metalnim materijalima kod zupčanika, znatno mogu odstupati od očekivanog radnog vijeka, odnosno životnog vijeka zupčanog prijenosnika. Kako promjena radnih uvjeta igra veliku ulogu u mehanizmima trošenja polimernih zupčanika tako je od iznimne važnosti proširiti znanja o primjeni polimernih zupčanih prijenosnika i omogućiti usporedbu rezultata s metalnim zupčanim prijenosnicima.

1.1 Motivacija za istraživanje

Polimerni sklopovi sve su češći elementi u modernim tehničkim sustavima. Razvojem postupaka prerade i ubrzanim razvojem novih materijala, javljaju se sve veće mogućnosti uporabe zupčanika u masovnoj i maloserijskoj proizvodnji. Usporedno, prema metalnim zupčanicima, postoji veliki nerazmjer u poznavanju odgovarajuće geometrije te se općenito javlja nedostatak iskustvenih vrijednosti kod projektiranja polimernih zupčanika. Dodatnu težinu predstavlja veliki izbor različitih polimernih materijala koji zbog svojih svojstava mogu biti više ili manje pogodni za izradu zupčanih parova. Kratko vrijeme uporabe polimernih materijala u konstruiranju zupčanika ima za pojavu nedostatak iskustvenih vrijednosti, što otvara mnoga neriješena pitanja vezana uz projektiranje polimernih zupčanih parova.

S obzirom na vrstu veze između makromolekula polimerni mogu se podijeliti u tri osnovne skupine, a to su [1]: plastomeri (fizičke veze između makromolekula), duromeri (umrežena struktura, kemijske veze) i elastomeri (rahlo umrežena struktura, fizičke i kemijske veze) te podskupina elastoplastomera koji posjeduju svojstva elastomera, a način prerade karakterističan je za plastomere (između makromolekula postoje samo fizičke veze). Za izbor materijala najčešće se primjenjuje AGMA norma (Udruženje američkih proizvođača zupčanika) [2] koja klasificira polimerne materijale prema određenim mehaničkim svojstvima, bitnim kod projektiranja zupčanih parova. Uz svojstva materijala izbor materijala određen je i prema dostupnim postupcima prerade polimernih zupčanika te veličini serije potrebnih proizvoda. Visina proizvodnih troškova u kombinaciji s konstrukcijskim zahtjevima vrlo često diktira izbor postupaka izrade polimernih zupčanika. Injekcijsko prešanje zbog relativno kratkog vremena izrade najčešći je postupak masovnije proizvodnje polimernih zupčanika. Uočavanjem specifičnih problema kod izrade polimernih zupčanika injekcijskim prešanjem, objavljena je posebna AGMA norma [3] koja ukazuje na potrebne geometrijske značajke, važne za ispravno funkcioniranje polimernih zupčanika. Na žalost sama norma ne daje nikakve konkretne vrijednosti već je opisnog karaktera, što se može pripisati nedovoljnoj istraženosti različitih polimernih materijala za tu primjenu.

Zbog ubrzanog razvoja polimernih materijala u normama se nalaze zastarjeli podaci pa je stoga, 1996. godine povučena najčešće upotrebljavana norma VDI 2545, (Udruga njemačkih inženjera) izdana 1980. godine. Ta se norma u praksi još primjenjuje zbog nedostatka normi specijaliziranih za proračun polimernih zupčanika.

Trenutno dostupne norme analiziraju polimerni zupčanic tijekom životnog vijeka prema konstantnim vanjskim utjecajima. Činjenica je da polimerni materijali imaju niža mehanička svojstva u usporedbi s metalnim materijalima te da su višestruko osjetljiviji prema radnim uvjetima odnosno utjecajima okoline. Zbog relativno velikog broja polimernih materijala te različitosti njihove strukture uočeni su različiti utjecaji okoline na stanje materijala a samim time i na životni vijek zupčanika. Budući da dostupne norme ne uzimaju u obzir promjenu stanja okoline, nepoznato je kako promjena atmosferskih uvjeta utječe na rad polimernih zupčanika, kakve se promjene javljaju u radu te ima li to utjecaja na ostvareni broj ciklusa tijekom životnog vijeka polimernog zupčanika.

Nedostatak iskustvenih vrijednosti kod određivanja promjena geometrijskih značajki za polimerne zupčanike predstavlja jedan od problema koji je površno pokriven normama te dodatno

otežava proizvođačima polimernih zupčanih prijenosnika proizvodnju prijenosnika više kvalitete. Različiti materijali pogodni za izradu zupčanika, zbog svoje strukture različito reagiraju na promjenu radnih uvjeta te promjenu geometrije tijekom rada i izrade. Potrebno je stoga posvetiti pažnju određivanju utjecaja temperature i vlage koji mogu utjecati na promjenu geometrijskih značajki tijekom rada. Prosječna relativna vlažnost zraka diljem svijeta može se razlikovati od 20 % do 90 %, ovisno o vremenu, danu i zemljopisnom položaju. Zbog sklonosti polimernih materijala k upijanju vode, odnosno bubrenju, potrebno je uvidjeti kakav je utjecaj temperature kod različitih stanja vlažnosti na tolerancije zupčanih parova, odnosno na životni vijek zupčanih parova, kako se to manifestira na količinu buke, te koji su iznosi graničnih opterećenja i obodnih brzina prema prethodno određenim kriterijima životnog vijeka. Za primjenu i ispravan rad od velike važnosti bio bi prikaz granica opteretivosti polimernih zupčanika. Takvim dijagramima dalo bi se značajan doprinos u praksi, te bi upotpunili saznanja o očekivanim načinima prekida rada polimernog zupčastog para.

Metalni zupčanci trajnost zupčanika interpretiraju prema trajnoj dinamičkoj čvrstoći korijena zuba, prema ISO 6363 (Međunarodna organizacija za normizaciju) [4] gdje se uzima da je 99 % vjerojatnosti odrađivanja $3 \cdot 10^6$ ciklusa. Predstavljenu normu moguće je primijeniti kod klasificiranja ostvarenja životnog vijeka za polimerne zupčanike kao referencu za klasifikaciju projektiranih zupčanika prema ostvarenom životnom vijeku.

1.2 Pregled dosadašnjih istraživanja

Pronalaskom sintetskih polimera, primjena polimernih materijala dolazi do izražaja kod izrade zupčanika, posebice do izražaja dolaze plastomeri koji su danas najzastupljenija skupina polimera s udjelom od oko 90% [5]. Polimeri u čvrstom stanju javljaju se kao amorfni staklasti, amorfni gumasti i kristalasti. Kristalasti polimeri sastoje se od amorfne i kristalne faze, a udio kristalne faze izražava se stupnjem kristalnosti [6]. Preporučeni plastomeri za proizvodnju polimernih zupčanika prema [2] najčešće su: poliamid (PA), poli(butilen-tereftalat) (PBT), polikarbonat (PC), poliiimid (PI), poli(oksi-metilen) (POM), poli(fenilen-sulfid) (PPS) i polietilen vrlo visoke molekularne mase (PE-UHMW). Provedbom ispitivanja na realnim modelima autori [7, 8] dokazuju mogućnost primjene poli eter-eter-ketona (PEEK) kao materijala koji zbog svojih svojstava, može biti vrlo dobar materijal za izradu polimernih zupčanika. Sustavno istraživanje u radu [7] provedeno je za nekoliko kombinacija materijala koji se upotrebljavaju za proizvodnju polimernih zupčanika u radu s čeličnim zupčanicima. Dan je doprinos u istraživanju opteretivosti u radu kod kombinacije materijala od poli(oksi-metilen)a te poliamida (PA 66) s različitim dodacima te različitim udjelom staklenih vlakana u paru s metalnim zupčanicima. Uporabom dodataka osnovnom materijalu kod poliamida (PA 66) moguće je postići sniženje temperature taljenja te povećanje ukupnog životnog vijeka kod rada bez podmazivanja. Prikazana su oštećenja koja se javljaju na polimernim zupčanicima tijekom životnog vijeka te su dane krivulje životnog vijeka kod rada u ulju za opisane kombinacije. Autor ističe mogućnost rada poli eter-eter-ketona (PEEK 450 G) i (CA30 PEEK) s dodacima ugljičnih vlakana kod rada u ulju, pri temperaturi do 120 °C koji nije moguć kod ostalih polimera. Isto tako, provedeno je istraživanje razine buke i izvedeni su zaključci da nema dokazane korelacije između razine buke i opterećenja, ali postoji ovisnost o brzini vrtnje. Provedeno je i istraživanje učinkovitosti prijenosa kod poliamida (PA 66) s dodacima od 20 % ugljičnih vlakana u kombinaciji s metalnim zupčanicom, gdje dolazi do povećanja

iskoristivosti prijenosa za 3 % odnosno 91 % na 94 %. Istraživanja kod poli(oksi-metilen)a nisu pokazala povećanje iskoristivosti prijenosa dodavanjem vlakana. Nastavkom istraživanja na zupčanicama od poli eter-eter-ketona (PEEK 450 G) u paru s metalnim zupčanicima [8] provedena su istraživanja određivanja odgovarajućeg premaza u svrhu snižavanja trošenja i produljivanja radnog vijeka. Mjerenjem relativnog trošenja, dani su zaključci koji dokazuju da se za smanjenje trenja, kod ove vrste zupčanika, najbolje pokazalo poli(tetrafluretilen) premaz (PTFE). U uporabi su bili i testirani premazi od molibden disulfida (MoS_2) te grafitni (BN) premaz.

Istraživanja prikazana u radu [9] daju glavne razlike u radu zupčanika od poli(oksi-metilen)a, poliamida (PA 66) te kompozitnog materijala u sastavu 55% (PA 66), 30% staklenih vlakana i 15 % (PTFE). Prikazana su kritična opterećenja kod ispitnih zupčanika u radu bez dodatka maziva s metalnim zupčanicima te izmjerene temperature boka zuba, s pomoću bezkontaktnog pirometra. Dan je prikaz testne postavke, uz pregled mogućih prednosti i nedostataka pri mjerenju temperatura boka zuba. Iscrpno su prikazani procesi trošenja te granice opteretivosti kod zupčanika od poli(oksi-metilen)a, dokazano je postojanje kritičnog opterećenja koji dovodi do ubrzanog povećanja trošenja i kolapsa ispitnog zupčanog para. Opisani su mehanizmi kolapsa kod polimernih zupčanika te je uočeno da kod PA 66 zupčanika može doći do pojave pukotine u korijenu zuba, odnosno u predjelu kinematske točke te je uočena pojava viskoestičnosti. Tijekom ispitivanja nije uočeno povećano trošenje kod zupčanika od PA 66 te kod kompozitnih zupčanika. Predložen je model izračuna maksimalne temperature na površini zupčanika te je temperatura zupčanika podijeljena na tri temperature: temperaturu okoline, temperaturu tijela zupčanika [10] i trenutnu temperaturu zuba u zahvatu.

Iscrpnim analiziranjem temperature u dodiru kod polimernih materijala, radom [11] koji se nadovezuje na istraživanje [9], napravljena je numerička metoda izračunavanja temperature boka zuba te je prikazana usporedba prema Blokovoju maksimalnoj temperaturi [12]. Izvedeni su zaključci o zadovoljavajućem poklapanju Blokove [12] temperature i metode [11]. Razlika u numeričkim vrijednostima nastala je jer Blokov model pretpostavlja statički izvor topline dok je kod rada [11] dodan izvor topline koji se mijenja duž zahvatne crte. Viskoelastičnost polimernih materijala koja se javlja kod zupčanika od poliamida i zupčanika od poliamida s dodatkom stakla, nije uzeta u obzir kod te metode, te je prikazana metoda primjerenija kod određivanja temperature dodira za polimerne materijale koji nemaju izražene relaksacijske procese pri temperaturi upotrebe, primjerice materijali poput poli(oksi-metilen)a. Radovima [13, 14], detaljnije su razrađeni modeli određivanja temperature tijela polimernih zupčanika od poli(oksi-metilen)a te je model uspoređen s rezultatima istraživanja. Dane su preliminarne smjernice u određivanju utjecaja modula na opteretivosti zupčanika od poli(oksi-metilen)a. Smanjenjem modula zuba raste opteretivost zupčanika zbog nižih brzina klizanja za istu brzinu vrtnje. Niže brzine klizanja dovode do nižih temperatura tijela i bokova zupčanika. Mjerenjem temperature u zahvatu nakon naglog zaustavljanja vrtnje s pomoću bezkontaktnog pirometra primijećen je nagli pad temperature, te je opisan način kontinuiranog mjerenja trošenja. Potvrđeno je naglo povećanje trošenja prekoračenjem graničnih opterećenja kod zupčanika od poli(oksi-metilen)a te je ukazano na pogreške kod određivanja temperature unutar važećih normi za polimerne zupčaničke BS 6168 [15].

Podrobnim razmatranjem mehanizama trošenja unutra rada [16] metodom dva diska, na diskovima od poli(oksi-metilen)a dokazano je da se s povećavanjem omjera klizanja i kotrljanja povećava dinamički faktor trenja. Trošenje je podijeljeno na blago, prijelazno i teško. Zaključeno je da su tijekom teškog trošenja, mehanizmi oštećenja bitno drukčiji nego kod blagog trošenja i

dolazi do pojava pukotina, pitinga, ljuštenja i trganja površine, što je povezano s povišenjem temperature u zahvatu. Poznato je da tijekom zahvata dolazi do promjena relativnih brzina klizanja po zahvatnoj liniji kod evolventnog ozubljenja [17]. Zupčanici od poli(oksi-metilen)a, koji rade u paru, zbog promjene brzine klizanja po zahvatnoj crti imaju povećano trošenje u području podnožja zuba. Preporuka autora je izbjegavati područje teškog trošenja ograničavanjem opterećenja i brzine vrtnje za zupčanike od poli(oksi-metilen)a koji rade u paru.

Ispitivanjima mehanizama oštećenja kod zupčanika PA 66, dobivenih injekcijskim prešanjem s različitim dodacima radom [18], prikazano je da postoje značajne razlike kod zupčanika koji sadržavaju dodatke u obliku vlakana i kod zupčanika od čistog poliamida 66. Testovi su provedeni u kombinaciji zupčanika polimer/metal na momentima u rasponu od 1,5 Nm do 3 Nm. Kod poliamidnih 66 zupčanika bez dodatka vlakana primijećeno je lošije odvođenje topline u usporedbi zupčanika s dodatkom vlakana osnovnom materijalu. Povišena temperatura, u kombinaciji s promjenama klizanja tijekom zahvata, dovodi do pojave pukotina oko područja kinematske točke kod zupčanika bez vlakana, dok kod zupčanika s dodatkom vlakana nema takvog učinka. Povišeno opterećenje može dovesti do loma u korijenu zuba koji je isti kao kod metalnih zupčanika. Dodavanjem vlakana osnovnom materijalu, može se povećati otpornost zupčanika na lom u korijenu zuba. Ako je smjer vlakana okomit na smjer sile, usporava se rast pukotine te savijanje zuba. Uporabom ugljičnih vlakana, povećava se tvrdoća boka zuba, što dovodi do nešto manje temperature u zahvatu prema zupčanicima sa staklenim vlaknima, ali zbog nešto slabijih adhezivnih sila između osnovnog materijala i ugljičnih vlakana dolazi do pojava mikro pukotina na boku zuba. Kod staklenih vlakana zbog većih adhezivnih sila između osnovnog materijala i vlakana, nema pojave mikro pukotina. Dodavanjem vlakana osnovnom materijalu povećat će se radni vijek zupčanika. Smjer vlakana u području zuba, dobiven injekcijskim prešanjem najčešće je okomit na smjer klizanja te ne pridonosi boljoj otpornosti boka na trošenje. Što je i glavni nedostatak zupčanika kod većih opterećenja s dodacima vlakana, a vlakna će ubrzati trošenje boka zuba, što može dovesti do teškog trošenja i prestanka rada zupčanika.

Trošenje polimernih zupčanika od poli(oksi-metilen)a istraženo je u radu [19] gdje je uočeno da postaje određene razlike u trošenju kod testova s dva diska, i trošenja u realnim uvjetima koja se javljaju u kombinaciji zupčanika metal/polimer. Isto tako uočeno je različito trošenje kod kombinacije materijala poliamid/poliamid. Podrobnije je istraženo trošenje zupčanika od poli(oksi-metilen)a koji rade u paru, dajući zaključke o ovisnosti trošenja o opterećenju koje je povezano s temperaturnim promjenama koji se javljaju tijekom zahvata. Visoko opterećenje takvih zupčanika određeno je maksimalnim toplinskim opterećenjem, dok je kod niskih opterećenja radni vijek određen trošenjem boka zuba. Podjelom procesa trošenja na tri različite faze kod POM zupčanika unutar radova [9, 20], zabilježeno je da u posljednjoj fazi radnog vijeka, prije prestanka rada zupčanika prouzročenog trošenjem kod 40 % istrošenosti debljine zuba, dolazi do savijanja zuba nastalog zbog temperature zupčanika i pada čvrstoće materijala zupčanika. Zupčanici od poliamida koji rade u području trošenja [20] svoj radni vijek mogu podijeliti na tri područja: uhodavanje, područje linearnog rasta te završne faze prije zastoja. Inicijalno trošenje kod uhodavanja vrlo je kratkog razdoblja, nakon toga dolazi područje linearnog rasta trošenja do završne faze koje je, u stvari trošenje nastalo dosežanjem maksimalne temperature zuba, te dolazi do deformacije i loma zuba i zaglavljivanja slično kao kod zupčanika od poli(oksi-metilen)a. Promjenom osnovnih kombinacija materijala sparivanjem zupčanika od poli(oksi-metilen)a i zupčanika od poliamida, dobivena je značajnija otpornost na trošenje za slučaj ako je zupčanic od poli(oksi-metilen)a

pogonski zupčanik, a zupčanik od poliamida (PA) gonjeni. Zamjenom pogonskog i gonjenog zupčanika, tako da je zupčanik od poliamida pogonski a zupčanik od poli(oksi-metilen)a gonjeni, dobiva se smanjena otpornost na trošenje naprema početnoj kombinaciji. Analiziranjem drugih materijala, pogodnih za izradu polimernih zupčanika, radom [21] provedena su istraživanja određivanja nosivosti kod zupčanika do polikarbonata (PC) i akrilonitril/butadien/stiren-a (ABS) te su izvedeni zaključci o pogodnosti uporabe takvih zupčanika kod područja izlaganju otvorenoj vatri, zraku, te ultraljubičastom zračenju i visokom postotku vlage. Opisana su najčešća oštećenja koja se javlja kod takvih zupčanika.

Analizom trošenja polimernih materijala, provedenih metodom dva diska na poliamidu 66 radom [22], variranjem promjene temperature kalupa tijekom injekcijskog prešanja, zaključeno je da se s povišenjem temperature kalupa povisuje i stupanj kristalnosti. To rezultira kao povećanom otpornošću na trošenje, ali i porastom koeficijenta trošenja koji pada pri temperaturi kalupa od 100 °C. Provedena su i istraživanja optimalne hrapavosti površine gdje je dokazano da je optimalna hrapavost u području od 2,5 do 4 μm , te da se sniženjem hrapavosti, ispod 1,5 μm , povećava vjerojatnost adhezijskog trošenja. Povišenjem brzine klizanja povećava se koeficijent trošenja materijala i faktor trenja, uz porast temperature. Sva istraživanja ponovljena su kod ispitnih tijela od poliamida 66, koji su tretirani radijacijom od 33 kGy svrhu povećavanja molekulske mase. Utvrđeno je povećanje raspona hrapavosti do 0,5 μm gdje nije zabilježeno adhezivno trošenje. Povišenjem područja brzine klizanja prema netretiranim uzorcima, utvrđen je negativan utjecaj povišenja temperature kalupa na koeficijent trošenja ispitnih tijela.

Istraživanjima mikro mehanizama trošenja poliamidnih materijala, radovima [23, 24] razmatran je utjecaj stupnja kristalnosti i orijentiranosti molekula unutar amorfne faze koja se javlja kao posljedica prerade, te je potvrđeno da su mikro mehanizmi, koji se javljaju kod trošenja, ovisni o stupnju orijentiranosti molekula, dok otpornost na trošenje ovisi o uređenosti amorfne strukture samog polimera. Dodavanjem vlakana PA 66, radom [25] prikazano je da je moguće utjecati na faktor trenja, a time i na trošenje materijala u dodiru. Analizirano je da se dodacima poli(tetrafluoretilena) (PTFE) i molibden disulfida (MoS_2) smanjuje faktor trenja. Dodavanjem poli(tetrafluoretilena) PTFE najviše se smanjuje faktor trenja i reducira trošenje postizanjem zaštitnog filma koji smanjuje dodir između kontra površine, dok su kod molibden disulfida (MoS_2) iznosi nešto manji. Promjenom opterećenja povećava se faktor trenja i povisuje temperatura u dodiru. Dostizanjem temperature taljenja između površina koje kližu, stvara se tanki sloj rastaljenog materijala koji se ponaša kao mazivo te ne dolazi do daljnjeg povišenja temperature. Dodavanjem vlakna osnovnom materijalu, utječe se na faktor trenja te na otpornost materijala na trošenje. Usporedbom rada u vodi i rada na okolišnom zraku, radom [26] dokazano je da rad u vodi smanjuje faktor trenja, što pozitivno utječe na smanjenje trošenja materijala, ali i povećava udjel vode u materijalu. Mjerenjem faktora trenja na diskovima od različitih polimernih materijala u kontaktu s metalom, u radovima [27, 28] prikazano je da postoji optimalna hrapavost površine koja daje najmanje faktore trenja. Kod polimernih materijala s niskim modulom elastičnosti (PTFE, PE-UHMW) hrapavost u području od $R_a = 0,02$ do $0,08 \mu\text{m}$ osigurava najniže vrijednosti faktora trenja dok je kod materijala s višim modulom elastičnosti (PA 6, PA 66, POM, itd.) dopuštena viša površinska hrapavost u rasponu od $R_a = 0,10 - 0,20 \mu\text{m}$, te da općenito faktor trenja ovisi o tvrdoći i čvrstoći polimernog materijala. Autori zaključuju da brzina klizanja utječe na faktor trenja kroz dva mehanizma, viskoelastičnost i zagrijavanje trenjem. Dostizanjem temperature taljenja, polimer doseže granicu gdje dolazi do prestanka rasta faktora trenja. Daljnjim povišenjem brzine klizanja,

faktor trenja smanjuje se do određene vrijednosti. Dodavanjem vode kao maziva polimernih materijala radom [29] općenito je dokazano da povećanje opterećenja daje povećanje trošenja za sve polimerne materijale, osim za UHMWPE kod hrapavosti površine od $R_a = 1 \mu\text{m}$. Povišenjem brzine klizanja očekivano dolazi i do povišenja temperature. Dolazi do smanjenja tvrdoće te se snižava otpornost na eroziju kod poliamidnih ispitnih tijela. Objašnjeni su mehanizmi apsorpcije vode kod poliamida te razlike u postojanosti na apsorpciju vode kod različitih poliamida.

Polimerni materijali ovisno o vrsti, pokazuju različitu sklonost upijanja vlage tijekom proizvodnje i uporabe. Poliamidi su skupina polimera koji pokazuju najizraženiju sklonost k upijanju vlage [30, 5]. Upijanje vlage kod poliamida izaziva mekšanje materijala i utječe na mehanička svojstva [31]. Dolazi do snižavanja čvrstoće i tvrdoće te do porasta žilavosti materijala a javlja se i promjena dimenzija, nastalih bubrenjem materijala. Radom [32] pokazano je da utjecaj vlage u materijalu može utjecati na trošenje ta da povećanjem vlage dolazi do povećanja trošenja materijala. Istraživanjem [33, 34] prikazano je da povećanje udjela vlage u osnovnom poliamidu izaziva povećanje dimenzija. Dodavanjem vlakana osnovnom materijalu može se utjecati na maksimalni mogući udjel vlage u osnovnom materijalu te je, osim toga, moguće utjecati na apsorpciju vlage i promjenu stupnja polimerizacije. Promjene nastale upijanjem vlage kod poliamida PA66 utječu na propagaciju pukotine, što je potvrđeno radom [35] gdje su dani zaključci o dvostruko bržem rastu pukotine kod uzoraka koji su tretirani kipucom vodom u trajanju od 135 sati u usporedbi sa ispitnim tijelima s 23% vlage unutar materijala. Sušena ispitna tijela, s 0% vlage, pokazuju tri puta sporiji rast pukotine u usporedbi s materijalom tretiranim kipucom vodom. Ispitna tijela tretirana vodom pokazala su iznimno visok rast pukotine ($>1 \text{ mm/ciklus}$) ili nije zamijećen nestabilan rast pukotine. Kod uzoraka sa 100 % i 5 0% zasićenja vlagom, zabilježena je velika hrapavost površine loma, nasuprot uzoraka s 0 % i 23 % vlage.

Iskoristivost zupčanog prijenosa važan je faktor kod projektiranja polimernih zupčanika. Radovima [36, 37] dani su zaključci kakav je utjecaj materijala te geometrije zuba na iskoristivost zupčanog prijenosa kod polimernih materijala. Provedenim ispitivanjima na različitim polimerima, izvedeni su zaključci da izbor materijala ne smije biti zanemaren kod određivanja iskoristivosti zupčanog para. Materijali poput poli(oksi-metilen)a pokazuju povećanu ovisnost opterećenja i brzine vrtnje. Kod poliamida, utjecaj opterećenja na iskoristivost prijenosa nije prevladavajući te najviše ovisi o brzini vrtnje. Ispitivanja potvrđuju da mazivo značajno povećava djelotvornost prijenosa. Istražen je utjecaj staklenih vlakana kao dodatak poliamidu gdje je zamijećeno lagano povećanje iskoristivosti kod takvih prijenosnika. Uparivanjem polimernih i metalnih zupčanika, zamijećeno je da je na malim brzinama iskoristivost lošija negoli kod sparivanja istorodnih materijala, dok je na višim brzinama iskoristivost pretežno ista. Istražujući utjecaj geometrije zupčanog para na iskoristivost prijenosa, provedena su mjerenja koja osiguravaju različita odstupanja osi te je zaključeno da smanjenjem zračnosti dolazi do naglog pada djelotvornosti prijenosa, dok povećanje zračnosti nema značajniji utjecaj na iskoristivost. Smanjenje visine zuba značajno povećava iskoristivost. Potvrđeno je smanjenje djelotvornosti kod kosih zupčanika u usporedbi s ravnim ozubljenjem. Brzinom vrtnje kod zupčanika, određuje se frekvencija opterećenja zuba. Promjenom brzine vrtnje i opterećenja, istraženo je radom [38], kakav je utjecaj brzine vrtnje kod poliamida (PA 6) s ojačanjem od staklenih vlakana, nasuprot čistog materijala. Potvrđena ja pretpostavka o boljem odvođenju topline kod materijala s dodatkom staklenih vlakana te nižim temperaturama zupčanika, što se, u konačnici, manifestira kao povećani radni vijek zupčanika. Povećanjem opterećenja uočena je pojava deformacije zuba, koja dovodi do pojave

pukotina u korijenu zuba i uz trošenje smanjuje radni vijek zupčanika. Kod viših opterećenja autori su dali zaključke o signifikantnom utjecaju brzine vrtnje na radni vijek zupčanog para, dok na malim opterećenjima tog utjecaja nema. Radom [39] provedeno je ispitivanje o utjecaju stupnja polimerizacije na iskoristivosti, te su izvedeni zaključci da je moguće povećati stupanj djelovanja boljom kristaličnošću polimera. Važnost takve modifikacije zupčanika dolazi do izražaja kod visokih opterećenja.

Prema ISO 53 [40] maksimalni polumjer zaobljenja podnožja kružnice iznosi $\rho_{fp} = 0,38 \cdot m$, sa svrhom postizanja više dinamičke izdržljivosti kod metalnih zupčanika. S obzirom na metodu izrade, polimerni zupčanci izrađeni injekcijskim prešanjem mogu imati bilo koji polumjer zaobljenja podnožja kružnice jer se ne izrađuju postupcima odvajanja čestica. Istraživanjem utjecaja radijusa zaobljenja [41] na radni vijek polimernih zupčanika, došlo se do zaključka da je moguće utjecati na radni vijek polimernih zupčanika promjenom polumjera zaobljenja podnožja kružnice. Zupčanci s višim polumjerom zaobljenja podnožja kružnice ostvarili su veći broj ciklusa za isto opterećenje. Većim polumjerom zaobljenja, isto tako, smanjuje se koncentracija naprezanja u području korijena zuba. Zupčanci s manjim polumjerom češće dovode od loma u području korijena dok je pojava pukotina u području kinematskog pola češća kod zupčanika s većim polumjerom zaobljenja podnožja kružnice. Autor navodi da smanjenjem polumjera dolazi do veće deformacije zuba u zahvatu. Istraživanja na geometriji polimernog zupčanika u svrhu produljivanja radnog vijeka radovima [42, 43, 44] opisuju se modifikacije koje daju pomake u svrhu smanjenja temperature zupčanika. Geometrije se odnose na nejednoliko proširivanje debljine zuba s ciljem snižavanja površinskog pritiska u određenom području dodira zuba u zahvatu, te na povećavanja površine za hlađenje zuba bušenjem rupe na zubu zupčanika.

Raspodjela naprezanja tijekom zahvata zuba mijenja se više u usporedbi prema metalnim zupčanicima. Osim povećanja stupnja prekrivanja zbog deformacija zuba dolazi i do utjecaja na raspodjelu savijanja u korijenu zuba. Kod sparivanja istih materijala u zahvatu raspodjela opterećenja je simetrična tijekom zahvata, dok kod sparivanja metalnih zupčanika s polimernim zupčanicom dovodi do pojave nesimetrije. Radovima [45, 46] opisuje se pojava smanjenja kontaktnog pritiska u području kinematske točke gdje se javljaju visoka povećanja kontaktnog pritiska na ulazu i izlazu iz zahvata. Svoju hipotezu autori navode kao jedan od razloga povećanog trošenja polimernih zupčanika uz napomenu da je visok površinski pritisak recipročan gibanju te da je jedan od glavnih mehanizama trošenja kod polimernih zupčanika.

U dosadašnjim radovima navedeno je da je najekonomičniji način izrade zupčanika postupak injekcijskog prešanja [6]. Takav način izrade pogodan je za masovnu proizvodnju. Izrada polimernih zupčanika injekcijskim prešanjem te pojedinosti o kojima treba voditi računa, predstavljeni su normom AGMA 909 [3]. Radovima [47, 48] predstavljeni su utjecaji na izradu zupčanika injekcijskim prešanjem kod materijala s dodatkom ojačanja, u obliku vlakana, osnovnom materijalu. Predstavljena je važnost usmjerenosti vlakana na točnost izrade zupčanika. Izvedeni su zaključci da se dodavanjem vlakana smanjuje utjecaj stezanja materijala kod hlađenja izradaka. Zupčanci izrađeni od PA66, s dodacima stakla, pokazuju manje odstupanje profila zuba prema zupčanicima bez dodataka staklenih vlakana. Kontrolom bočne linije zuba kod zupčanika s dodatkom staklenih vlakana uočeno je veće odstupanje rezultata. To je objašnjeno promjenom usmjerenosti vlakna po debljini zupčanika i utjecajem stezanja koje se mijenja s usmjerenošću vlakana. Mjerenjem radijalnog odstupanja te mjerenjem debljine zuba, dani su zaključci da je veće odstupanje prisutno kod zupčanika sa staklenim vlaknima. Simulacijom usmjerenosti vlakna, radom

[48] prikazan je raspored vlakana za slučaj s tri ušća po jednom zupčaniku. Prikazani su šavovi spajanja, nastali radi više ušća, uz zaključke da su dijelovi, koji se nalaze bliže ušću, izloženi višem tlaku stlačivanja, što doprinosi manjem stezanju. Autori daju generalni zaključak da i dodavanjem vlakana materijalu stezanje materijala manje, ali dolazi do nejednolikosti u stezanju izazvanih usmjerenošću vlakana. Radom [49] prikazana je promjena u usmjerenosti vlakana te ovisnost o smjeru tečenja materijala. Prema debljini ispitnog tijela prikazan je vanjski i unutarnji sloj koji nastaje injekcijskim prešanjem uzoraka, prema smjeru gibanja čestica materijala, te različita usmjerenost vlakana koja se mijenja prema dubini materijala za isti smjer tečenja materijala.

Stezanje materijala [50] jedan je od glavnih problema koji se javljaju pri izradi polimernih izradaka općenito a stezanje polimernih zupčanika ima negativan utjecaj na geometriju zupčanika. Promjenom brzine punjenja alata, tlaka ubrizgavanja, te naknadnog tlaka, radom [51] prikazana je optimizacija kojim je parametrima moguće utjecati na bolju kvalitetu izrade polimernih zupčanika. Radom [52] prikazana je optimizacija izrade polimernih zupčanika injekcijskim prešanjem prema položaju ušća, sustavu ubrizgavanja i hlađenja.

Buka u prijenosnicima snage i gibanja kod metalnih zupčanika sustavno je obrađena radom [53], gdje autor navodi neke od glavnih izvora buke kod metalnih prijenosnika. Prikazano je kako promjena modula, pomak profila, i ostale geometrijske karakteristike zupčanika, mogu manifestirati na buku, te su dane smjernice za ispitivanje buke kod zupčanih prijenosnika. Buku kod polimernih zupčanika isto je tako moguće, donekle, regulirati geometrijskim karakteristikama. Dobra prigušujuća svojstva polimernih materijala ponajprije su zaslužna za naziv polimernih zupčanika kao tihih zupčanika. Radom [54] prikazano je kako se buka manifestira s povećanjem trošenja i istrošenosti zuba, dok je radom [55] navedeno da se povećanjem udjela vlakana u osnovnom materijalu PA 66 zupčanika utječe na prigušenje vibracija i buke. Autori to objašnjavaju da se dodavanjem staklenih, odnosno ugljičnih vlakana poliamidu, smanjuje viskozna komponenta [1, 56, 6] u osnovnom materijalu te materijal postaje krući i prenosi bolje vibracije. Kombiniranjem različitih materijala zupčanika u paru, radom [57] dobiveni su sljedeći rezultati: razina buke ovisi općenito o ispitnom opterećenju i brzini vrtnje, a pokazalo se da zupčanci u kombinaciji poliamid/poliamid (PA/PA) imaju najviše prigušenje buke. Zupčanci od poli(oksi-metilen)a u paru (POM/POM) pokazali su najmanje prigušenje, ali dodatkom maziva buka se osjetno snižava. Kombinacije zupčanih parova polimer/metal isto tako daju niže vrijednosti buke, što je i potvrđeno radom [58]. Iscrpnim ispitivanjima, radom [59] izloženo je da je jačina zvuka u vezi s kvalitetom površine u dodiru za sve materijale, dok se kod zupčanika od poli(oksi-metilen)a buka na visokim frekvencijama smanjuje trošenjem zupčanika. Utjecaj vlakana kod zupčanika od poliamida prisutan je samo na visokim frekvencijama nakon uhodavanja zupčanika.

Iz pregleda dosadašnjih istraživanja vidljivo je da je utjecaj vlage kod polimernih materijala nedovoljno istražen. Izložene su neke od činjenica kako vlaga utječe na polimerne materijale, ponajprije na poliamid (PA), ali ne postoje iskustvene vrijednosti koje bi ukazivale na granicu opteretivosti zupčanika koji rade u području povišene ili snižene vlage. Ujedno nema podataka o graničnim temperaturama prema različitim radnim uvjetima te kako se manifestira buka u različitim radnim uvjetima.

1.3 Hipoteza rada

Nedovoljna istraženost područja te slaba pokrivenost literaturom i nedostaci iskustvenih vrijednosti ostavljaju mnoga neriješena pitanja unutar područja primjene i projektiranja polimernih zupčanika. Pokušat će se riješiti neka otvorena pitanja iz prethodnog poglavlja koja su prisutna kod projektiranja polimernih zupčanika te ukazati na nepoznanice za daljnja istraživanja.

Zbog specifičnosti pojedinih konstrukcijskih važnih polimera i njihove interakcije s vlagom te promjenama koje se javljaju unutar takvih zupčanika, važno je poznavati kako vlaga u kombinaciji s temperaturom utječe na promjenu dimenzija tijekom rada zupčanika, što je izraženo u hipotezi:

Pretpostavka je da je moguće odrediti kako promjena pomaka profila, sadržaj vlage u materijalu i temperatura polimernih zupčanika utječe na ukupni životni vijek zupčanika.

Hipoteza rada temelji se na postojećim saznanjima o projektiranju polimernih zupčanika te podacima dosadašnjih istraživanja. Može se ustvrditi da je većina istraživanja usmjerena prema sljedećim ciljevima:

- istražiti kako promjena pomaka profila, u interakciji sa stanjem okoline, utječe na životni vijek polimernih zupčanika;
- istražiti utjecaj temperature u kombinaciji s ispitnim opterećenjima na životni vijek polimernih zupčanika;
- istražiti kako promjena pomaka profila u interakciji sa stanjem materijala zupčanika utječe na razvoj buke koja se javlja tijekom rada zupčanika.

Odgovori dobiveni takvim istraživanjima, upotpunit će saznanja o projektiranju polimernih prijenosnika te pridonijeti iskustvenim podacima, dobivenim ispitivanjima na stvarnim zupčanim parovima, simulirajući rad u realnim uvjetima.

1.4 Očekivani znanstveni doprinos

Valja očekivati da će se primjenom prethodno opisane ispitne postavke dati doprinos boljem razumijevanju procesa trošenja i nastalih oštećenja tijekom životnog vijeka polimernih zupčanika. To bi trebalo omogućiti dobivanje iskustvenih vrijednosti, važnih za točnije i pouzdanije projektiranje polimernih zupčanika te smanjiti potrebu za skupim i dugotrajnim ispitivanjima i dopuniti postojeću literaturu.

U radu će se dati doprinos u postavljanju zakonitosti vezanih uz granice opteretivosti te širenja oštećenja na polimernim zupčanicima. Analizom podataka te optimizacijom podataka prikupljenih tijekom praktičnog dijela istraživanja, definirat će se područje kritičnih srednjih temperatura zuba u zahvatu za dana opterećenja i ispitni materijal. Istražit će se kako promjena geometrijskih karakteristika zupčanika utječe na ostvareni broj ciklusa do pojave određenih oštećenja.

Osobit doprinos očekuje se u utvrđivanju utjecaja stanja ispitnog materijala (u funkciji stanja okoline) na pojavu oštećenja kod polimernih zupčanika. Pokušat će se definirati kriterij klasifikacije kvalitete rada polimernih zupčanika te odrediti kako se izlazne mjerne veličine ispitne postavke mijenjaju tijekom pojave određenih oštećenja.

Glede daljnjih istraživanja, predstavljeno ispitno postolje te dobiveni rezultati čine dobru osnovu za daljnja iscrpnija istraživanja jer postavljaju granicu opteretivosti za polimerne zupčaničke samo za jednu vrstu materijala u paru. Polimerni materijali velika su skupina materijala i sadržavaju više vrsta pogodnih materijala za izradu zupčanika koji se, prema svojoj strukturi značajno

razlikuju. Ostaje za potvrditi budućim istraživanjima kako se granice opteretivosti mijenjaju za te materijale. Isto tako ostaje nepoznanica o granicama opteretivosti za druge kombinacije polimernih materija u paru s metalnim zupčanicima, koji su isto tako u uporabi.

1.5 Struktura rada

Rad je tematski podijeljen na tri cjeline, raspoređene u šest poglavlja. Prva cjelina odnosi se na teorijske osnove o polimernim materijalima, važnim za projektiranje polimernih prijenosnika. Druga se cjelina odnosi na problematiku određivanja tolerancija kod polimernih zupčanika te se provodi usporedba prema određivanju tolerancija kod metalnih zupčanika, dok se u trećoj cjelini razmatraju dobiveni obrađeni rezultati istraživanja i daje konačan zaključak.

Prvim poglavljem uvodi se u problematiku projektiranja polimernih zupčanika, nedostacima u literaturi, da bi se ukazalo na motivaciju istraživanja autora u tom području. Navedeni su ciljevi i metodologija, hipoteza rada kao i očekivani doprinos.

U trećem poglavlju ukratko su opisani materijali koji se primjenjuju za izradu polimernih zupčanika, te se uvodi u problematiku utjecaja određenih svojstava polimernih materijala na izradu i rad polimernih zupčanika. Opisana su osnovna svojstva poliamida kod djelovanja opterećenja te utjecaj vode na polimerne materijale.

Trećim poglavljem prikazane su okvirno karakteristike kontrole izrade polimernih zupčanika prema načinu proizvodnje polimernih zupčanika. Prikazan je utjecaj temperature, vlage i deformacije na izračun bočne zračnosti prema funkciji polimernih zupčanika.

Četvrto poglavlje započinje opisom eksperimentalnog ispitnog postolja pomoću kojeg su provedena eksperimentalna istraživanja. Pritom je detaljno opisan izbor pogona, te način rada ispitnog postolja s osvrtom na mjerni sustav ispitnog postolja.

U petom poglavlju dan je opis i koncipiranje eksperimenta te odabir ispitnih parametara uz pojašnjenje određivanja granica varijacije pokusa. Definirani su kriteriji zadovoljavanja radnog vijeka te su opisana ograničenja eksperimentalnog postolja. Prikaz rezultata eksperimentalnog istraživanja dan je za sve izlazne veličine, s osvrtom na izdvajanje pojedinih značajki uz međusobnu usporedbu dobivenih rezultata. Opisan je način dobivanja granica opteretivosti te je prikazana proširena granica uz matematičke izraze dobivenih veličina.

U zadnjem poglavlju rada izvedeni su zaključci dobiveni temeljem dobivenih rezultata eksperimentalnog istraživanja, te su dane smjernice za buduće moguće proširivanje istraživanja.

Polimerni materijali u proizvodnji zupčanika

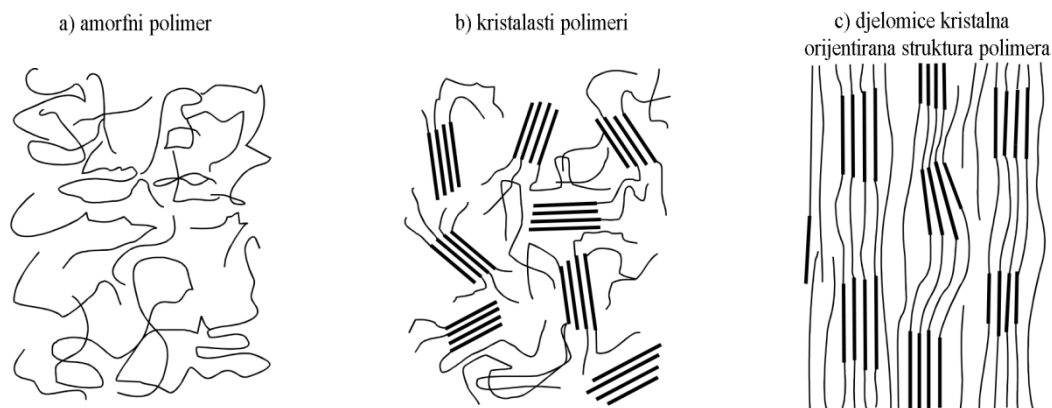
Uobičajena podjela polimera temeljena je na ponašanju polimera pri povišenim temperaturama, te se time polimeri dijele na plastomere, duromere, elastomere, i posebnu podskupinu koju čine elastoplastomeri. Elastoplastomeri (TE) se još i nazivaju termoplastična guma, a karakterističnost im je da su taljivi, topljivi i bubre. Prerađuju se isto kao plastomeri, a praoblikovanjem postižu svojstva tipična za elastomere.

Duromeri (duroplasti), su skupina materijala koji se sastoje se od prostorno gusto umreženih makromolekula povezanih kemijskim vezama, netaljivi su, netopljivi i ne bubre. Kod proizvodnje zupčanika često se upotrebljavaju u kombinaciji s materijalima koji, u pravilu, povišuju čvrstoću i krutost. Takvi materijali često se nazivaju duromerni kompoziti, a sastoje se od matrice (duromera) i staklenih ili ugljičnih vlakana kao ojačavala. Tipični duromeri za proizvodnju kompozita su poliesteri (PEST), vinilesteri (VE) te epoksidi (EP). Poliesteri su najčešće u primjeni zbog univerzalnih svojstava te su najprihvatljiviji zbog cijene.

Elastomeri su skupina sintetičkih i prirodnih polimera čije su molekule međusobno povezane manjim brojem poprečnih fizičkih (vodikove, van der Waalsove) i kemijskih veza. Karakterizira ih vrlo mala tvrdoća i visoka elastičnost. Ta skupina materijala nije pogodna za izradu polimernih zupčanika za prijenos snage i gibanja.

Plastomeri su najveća skupina polimera čije su molekule međusobno povezane fizičkim vezama, najviše su rasprostranjeni s udjelom do 90 % u ukupnoj proizvodnji polimera, a najčešće se primjenjuju kod izrade polimernih zupčanika. Plastomeri prema stupnju uređenosti strukture, mogu biti amorfni i kristalasti, što je vidljivo na Slici 2.1. Amorfna struktura plastomera može se okarakterizirati odsutnošću pravilnog prostornog razmještaja na većoj prostornoj skali. Ne postoje uređene strukture reda veličine valne duljine svjetlosti (0,4 do 0,7 μm) pa nema loma svjetlosti, što čini homogene amorfne polimere prozirnim bez dodatka pigmenta ili ojačala. Mehanička svojstva amorfni polimera pokazuju zadovoljavajuću prekidnu čvrstoću, dok krutost i krhkost pada s povišenjem temperature.

Kristalna struktura je skupina prostorno složenih lanaca. Takve skupine nastaju radi djelovanja međumolekularnih sila, a jačanjem sekundarnih veza između linearnih makromolekula dolazi do stvaranja bolje uređenosti kristalne strukture. Većina polimernih materijala su kristalasti, sastavljeni od kristalnih i amorfni područja povezanih u jednu cjelinu. Polimeri kristalaste strukture nisu postojani pri povišenim temperaturama, postaju mekani, dok snižavanjem temperature postaju krhki, i podložni su starenju, što im ograničava područje rada.



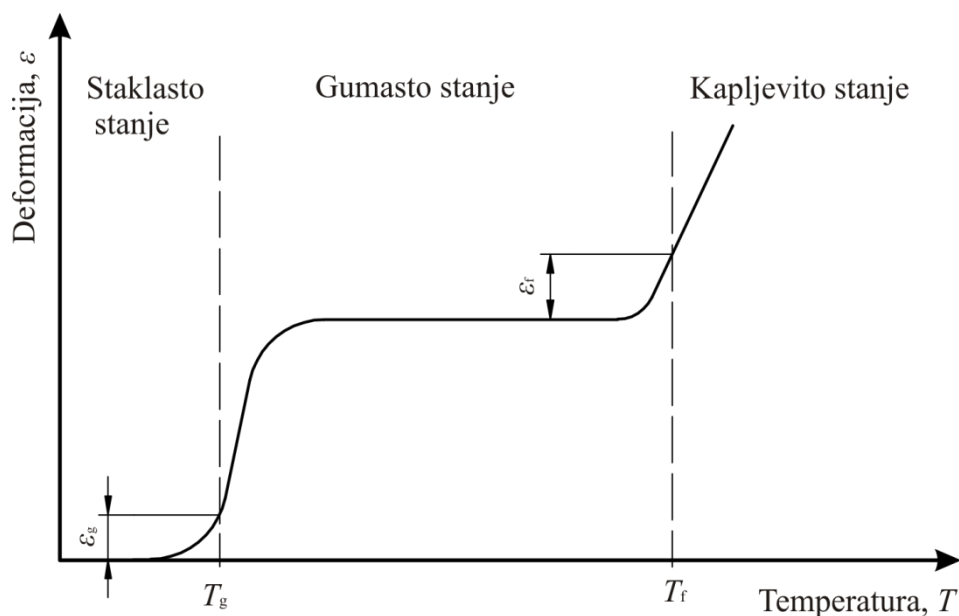
Slika 2.1 Struktura plastomera [60]

2.1 Fizička stanja polimera

Općenito vrijedi da je fizičko stanje polimera posljedica gibljivosti makromolekula zbog djelovanja temperature. Ovisno o temperaturi moguće je imati tri fizička stanja polimera, prema Slici 2.2:

- čvrsto staklasto, kristalno,
- gumasto,
- kapljevito.

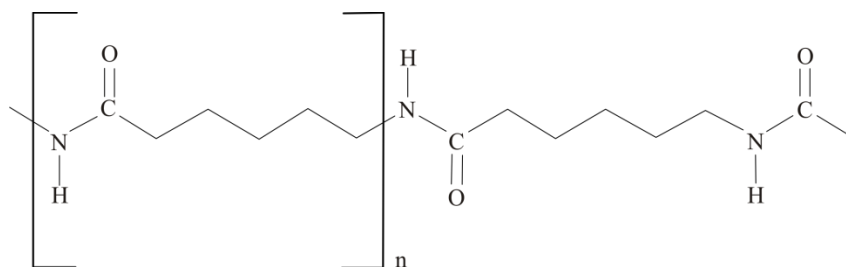
Kapljevitom stanju materijala za konstrukcijsku primjenu nije značajno dok staklasto i gumasto stanje odgovara čvrstom stanju materijala. Prijelazi iz stanja u stanje nisu oštri te postoje prijelazna područja koja se prikazuju dogovorno određenim temperaturama. Prijelaz iz staklastog u gumasto stanje prikazuje se temperaturom T_g (staklište) dok je prijelaz iz gumastog u kapljevito stanje prikazan temperaturom T_f (tecište). S gledišta konstrukcijske primjene kod amorfni plastomera značajna je samo temperatura staklastog prijelaza T_g na kojoj dolazi do značajnijeg gubitka mehaničkih svojstava i mogućnosti obavljanja funkcije. Kod kristalnih plastomera važna je temperatura staklastog prijelaza T_g , gdje dolazi do omekšavanja dijela kristalne strukture, ali su mehanička svojstva još uvijek zadovoljavajuće dobra za konstrukcijsku primjenu do temperature tecišta T_f , nakon čega dolazi do prijelaza u viskofluidno stanje. Konstrukcijska primjena kod materijala s kristalnom strukturom je u području do temperature tecišta T_f .



Slika 2.2 Termomehanička krivulja polimera [60]

2.2 Poliamidi

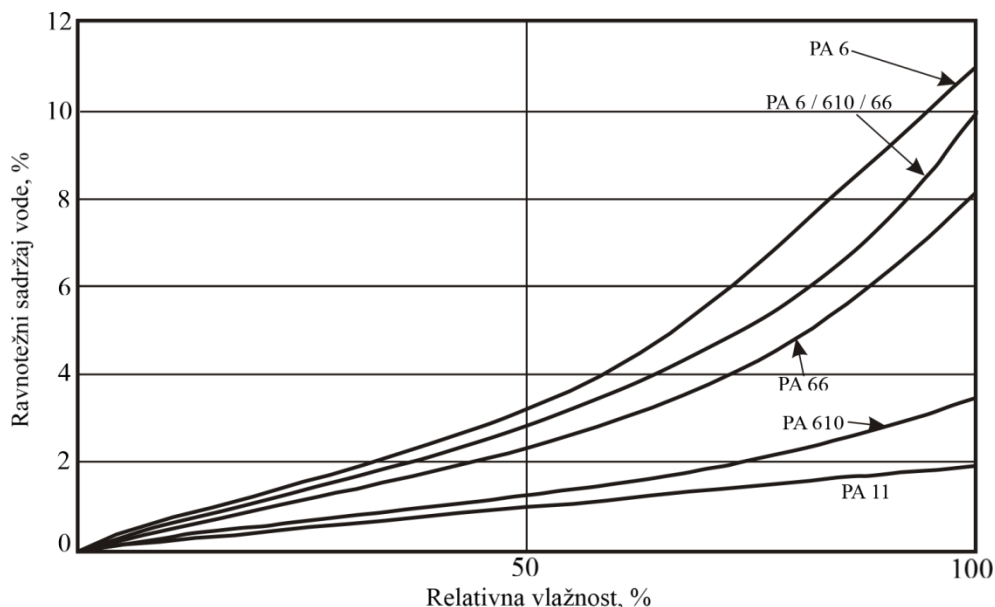
Poliamidi su skupina najčešće kristalastih plastomera koja prema uporabi pripada u skupinu konstrukcijskih plastomera te je čest materijal za izradu polimernih zupčanika i drugih konstrukcijskih elemenata. Prema svojim strukturnim karakteristikama, za poliamide je karakteristična amidna skupina $-\text{CO}-\text{NH}-$ ugrađena između ostalih atomskih skupina. Do sada poznati poliamidi sadržavaju u osnovnom dijelu ponavljajuće jedinice od 4 do 13 ugljikovih atoma. Ponavljanjem $-\text{CO}-\text{NH}-$ (Slika 2.3), polarne skupine, u pravilnim razmacima, dolazi do stvaranja pretežno kristalne strukture s visokom međumolekularnom privlačnosti. Kombinacija visoke molekularne privlačnosti u kristalnim područjima i pokretljivost u amorfnom području zaslužna je da ta skupina polimera ima zadovoljavajuća mehanička svojstva iznad temperaturnog intervala staklastog prijelaza T_g . Promjenom monomera za dobivanje poliamida postoje sljedeće poznate vrste poliamida: PA 6, PA 11, PA 12, PA 66, PA 610, PA 612, PA 66/6, PA 46, PPA, PAA.



Slika 2.3 Kemijska struktura PA 6 [61]

Na svojstva poliamida značajno utječe stupanj središtenosti strukture, odnosno stupanj kristalnosti [22]. Za poliamide stupanj kristalnosti može biti u vrlo velikom rasponu od 10% [31] za brzo hladene dijelove tanke stjenke, pa do 60% za sporo hladene izratke, s većom debljinom stjenke. Tako veliki raspon stupnja kristalnosti utječe na mehanička svojstva samog izratka, povećava se udjel kristalaste strukture u materijalu nasuprot amorfno dijela strukture. Manje

amorfne strukture pridonose manjoj apsorpciji vode te je manji utjecaj vlage na svojstva polimera. Sve vrste poliamida, zbog svoje strukture, skloni su apsorpciji vode. To utječe na njihova svojstva, ali je taj utjecaj različit te osim stupanja kristalnosti ovisi i o vrsti poliamida. Prema Slici 2.4 vidljivo je koji poliamidi imaju veću, a koji imaju manju tendenciju apsorpcije vode.



Slika 2.4 Utjecaj relativne vlažnosti na apsorpciju vode kod poliamida [31]

2.2.1 Apsorpcija vode kod poliamida

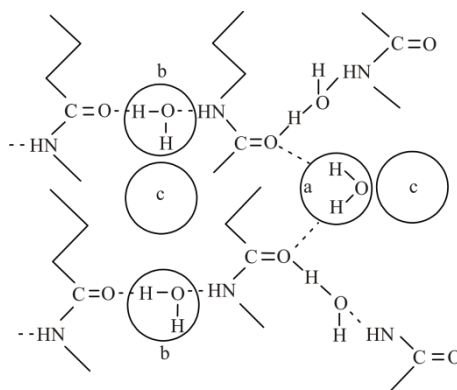
Apsorpcija vode ovisi o stupnju kristalnosti unutar poliamida te utječe na skoro sva fizička svojstva poliamida. Uzrok apsorpciji vode je amidna $-\text{CO}-\text{NH}-$ skupina koja zbog svoje visoke polarnosti ima visok afinitet prema vodi. Taj mehanizam nije još do kraja razjašnjen, međutim poznato je da postoji mogućnost stvaranja vodikovih mostova, ali i vlastitih asocijacija (Slika 2.5). Molekule vode pri ulaženju u poliamid ulaze preko vodikovih mostova, stvarajući nove vodikove mostove preko amidne skupine i oslabljujući postojeće međumolekularne sile u poliamidu. To izaziva pokretljivost makromolekularnih segmenata što se odražava kao snižavanje temperature staklastog prijelaza T_g amorfno područja. U konačnici to znači smanjenje područja uporabe za konstrukcijsku primjenu. Apsorpcija vode je funkcija odnosa CH_2 i CONH skupina, što dovodi do zaključka da što je manja koncentracija amidnih skupina u poliamidu to je i manja tendencija apsorpcije vode. Brzina apsorpcije vode isto tako ovisi o odnosu CH_2 i CONH skupina, kristaličnosti, debljini uzorka, relativnoj vlažnosti okoline te vremenu izlaganja. Poliamid apsorbira vodu iz okoline sve dok se ne dostigne ravnotežno stanje sadržaja vode u materijalu i sadržaja relativne vlažnosti u okolini. Pri kratkoročnim promjenama vlage u okolini može doći do tek neznatnih promjena u sadržaju vode u poliamidu. Uspostava ravnotežnog stanja pri sobnoj temperaturi neznatna je te se zakonitost difuzije može opisati prvim Fickovim zakonom prema izrazu 2.1

$$I = -D \frac{\delta c}{\delta x} \quad (2.1)$$

gdje je :

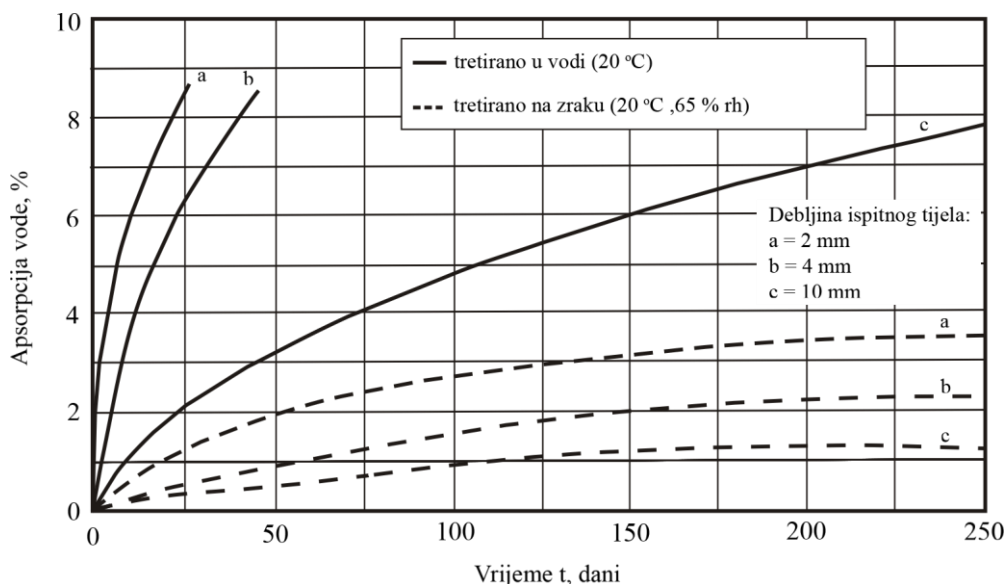
I - tijek difuzije

- D - koeficijent difuzije
 c - koncentracija difundirajućeg medija na mjestu x



Slika 2.5 Apsorpcija vode u poliamidu [31]

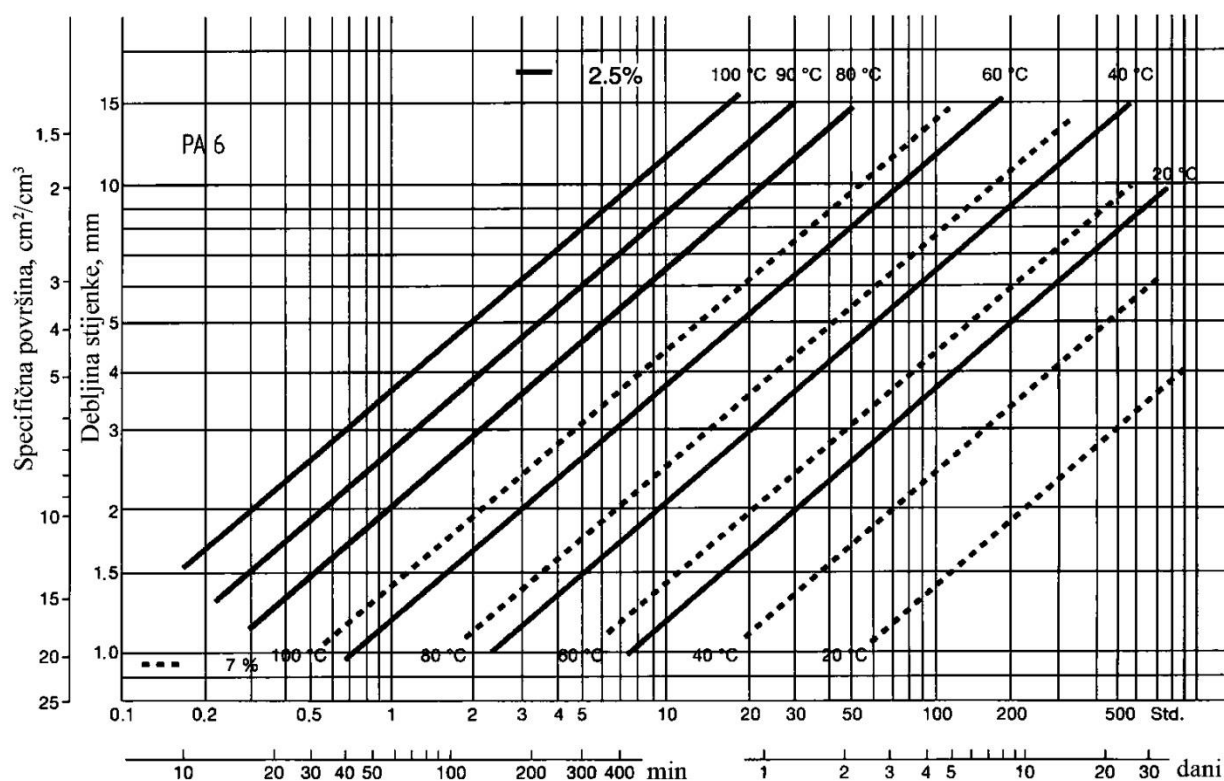
Prema slici 2.6 za poliamid PA 6 prikazan je tijek apsorpcije vlage do zasićenja u različitim okolinama te za različite debljine materijala. Može se uočiti da je najbrže zasićenje moguće postići u vodi, odnosno pri djelovanju pare, te da brzina zasićenja osjetno opada s debljinom uzoraka. Prilikom apsorpcije vode, dolazi do povećanja mase koja je posljedica difuzije molekula vode u strukturu poliamida, što dovodi do pojave bubrenja materijala, odnosno promjena dimenzija. Promjena dimenzija je linearna kod poliamida bez dodatka ojačala i iznosi oko 0,25% [31] od porasta mase.



Slika 2.6 Apsorpcija vode PA 6 za različite debljine ispitnih tijela, dimenzije 120 x 20 mm [31]

2.2.2 Kondicioniranje poliamida

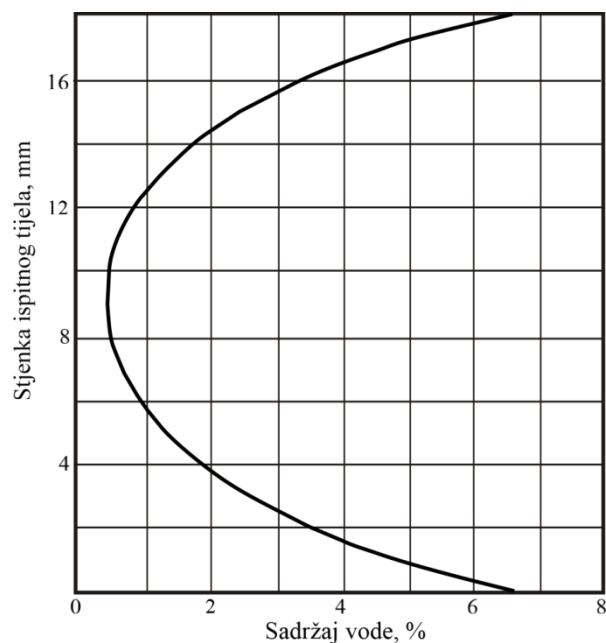
Prilikom izrade dijelova od poliamida injekcijskim prešanjem, izradak je relativno suh s minimalnim postotkom vode u strukturi, posebice ako je materijal prije injekcijskog prešanja sušen. Da bi se materijal doveo u ravnotežno stanje nakon izrade, potrebno je izradak kondicionirati (*e. conditioning*), osim ako izradak mora raditi u radnoj okolini s relativnom vlažnošću od 0%. Prema Slici 2.6, kondicioniranje na okolnom zraku je spor proces, dok kondicioniranje u vodi ubrzava proces te je moguće skratiti vrijeme tretmana. Vrijeme kondicioniranja prema Slici 2.7 ponajprije će ovisiti o ciljanoj relativnoj vlažnosti radne okoline, odnosno maksimalnoj zasićenosti materijala za tu relativnu vlažnost (Tablica 2.1), debljini izratka i temperaturi vode u kojoj se vrši kondicioniranje. Vrijednosti u Tablici 2.1 prikazuju veliku razliku u zasićenosti materijala ako je materijal u vodi ili na atmosferi od 50 % relativne vlažnosti pri temperaturi 23 °C kod različitih vrsta poliamida. Dodavanjem dodataka osnovnom materijalu vidljivo je smanjenje zasićenja mase za isti materijal. Najniže vrijednosti zasićenja mase zabilježeno je kod PA 12 dok je najveće kod PA 46. Poliamid 6 prema vrijednostima u Tablici 2.1 prikazuje određeno smanjenje zasićenja mase ako je materija lijevan, što je moguće povezati s stupnjem kristalnosti odnosno brzini hlađenja uzorka. Prodiranje vode u stjenku materijala je funkcija debljine izradaka. Najveća koncentracija vode biti će na samoj površini te opada s prodiranjem u materijal, prema Slici 2.8. Često se dodavanjem dodataka u obliku staklenih vlakana može, osim na mehanička svojstva, utjecati i na smanjenje apsorpcije vode. Dodavanjem staklenih vlakna (PA 6 GF 30) osnovnom materijalu smanjuje se maksimalna zasićenost takvog materijala (Tablica 2.1).



Slika 2.7 Vrijeme kondicioniranja poliamida PA 6 [56]

Tablica 2.1 Apsorpcija vode za neke vrste poliamida prema ISO 62 [56]

Poliamid	Zasićenja mase [%]	
	u vodi, 23 °C	Standardna atmosfera, 23 °C, 50 % relat. vlažnosti
PA 6	9,5	3
PA 6 GF 30	6,6	2,1
PA 6 lijevani	8	2,8
PA 11	1,8	1
PA 12	1,5	0,7
PA 66	8,5	2,8
PA 66 GF 30	5,5	1,7
PA 610	3,3	1,4
PA 46	13,5	3,7



Slika 2.8 Distribucija vlage po debljini stijenke, debljine 18 mm kod PA 6, tijekom tri godine uporabe u vodi [56]

2.2.3 Viskoelastičnost

Posebnost poliamida i općenito plastomera kod djelovanja opterećenja je da se pojedini makromolekularni lanci prilikom djelovanju opterećenja pregrupiravaju, u svrhu postizanja ravnotežnog stanja. Brzina pregrupiranja ovisi o brzini djelovanja opterećenja i o strukturi samog poliamida. Prvo dolazi do pomaka unutar amornog dijela strukture pri nižim opterećenjima, daljnjim povećavanjem opterećenja u preuzimanje naprezanja uključuju se i kristalna područja. Takvi materijali prilikom konstantnog opterećivanja nemaju krivulju deformiranja koja je uobičajena za čelike. Ukupna deformacija ovisna je o trajanju djelovanja opterećenja. Takvo ponašanje materijala, pod djelovanjem opterećenja, naziva se viskoelastičnost (Slika 2.9). Ukupna deformacija ε_u sastoji se od energijske deformacije ε_{el} , entropijske viskoelastične deformacije ε_r i plastične (viskozne) deformacije ε_p , prema izrazu 2.2.

$$\varepsilon_u = \varepsilon_{el} + \varepsilon_r + \varepsilon_p \quad (2.2)$$

Viskozna komponenta deformacije kod konstantnog opterećenja je nepovratna te je vremenski ovisna pojava. Posljedica je pregrupiranja makromolekula u materijalu, nastalog zbog opterećenja te zbog utjecaja temperature koje izazivaju veću pokretljivost makromolekula unutar materijala. Posebni slučaj viskoelastičnog ponašanja je anelastičnost, to je temperaturno vremenski ovisna pojava koja iščezava prestankom djelovanja opterećenja i javlja se kod malih deformacija, nema plastične deformacije te uzrokuje prigušenje.

Poliamid podvrgnut opterećenju može reagirati na tri načina:

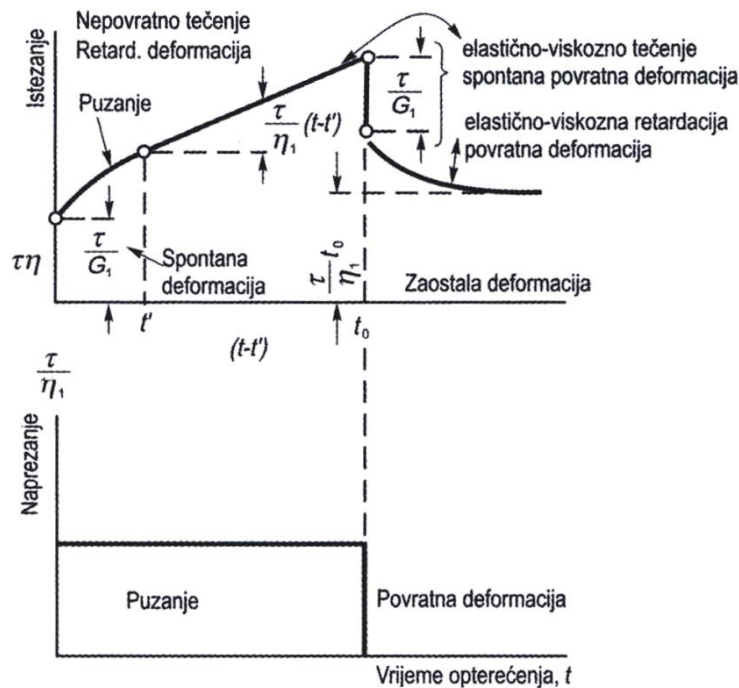
1. Tijelo reagira vrlo brzo, to se očitava u visokome modulu elastičnosti za tu temperaturu. Reakcija brzog odziva javlja se na području temperatura ispod staklastog prijelaza T_g .
2. Djelovanjem opterećenja ili povišene temperature dolazi do viskoznog tečenja, što se očituje niskim modulom. Dolazi do dijela nepovratnog klizanja segmenata makromolekula. Takvo stanje očituje se za amorfnu strukturu iznad temperature staklastog prijelaza T_g i općenito kod polimera u rastaljenom stanju koji također imaju amorfnu strukturu.
3. Tijelo se ponaša entropijski elastično, što je karakteristično kod niskog modula elastičnosti i kod velikog udjela povratnog klizanja segmenata makromolekula. Takvo se stanje manifestira kao velika deformacija, dolazi do usmjeravanja makromolekula u smjeru djelovanja opterećenja, dok je sam postupak usporen radi djelovanja viskoznih sila trenja.

Opisanim načinima regiranja poliamida, na opterećenje primjenom kombinacije *Maxwellovog* i *Voight-Kelvinovog* modela [62], dobiven je *Burgerov* model [6, 56], izvođenjem izraza ukupna deformacija prema Burgerovom modelu, (Slika 2.10) iznosi:

$$\varepsilon_u = \frac{\tau}{G} + \varepsilon_\infty \cdot [1 - e^{(-t/t_r)}] + \frac{\tau}{\eta} \cdot t \quad (2.3)$$

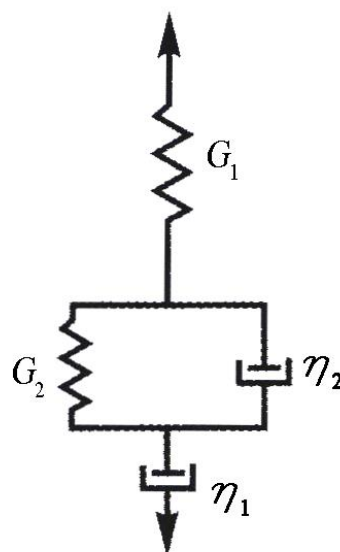
gdje je:

- ε_u – ukupna deformacija, mm
- τ – naprezanje, N/mm²
- G – modul smičnosti, N/mm²
- ε_∞ – najveća zabilježena deformacija, mm
- t – vrijeme trajanja opterećenja, s
- t_r – vrijeme retardacije, s
- η – prigušenje



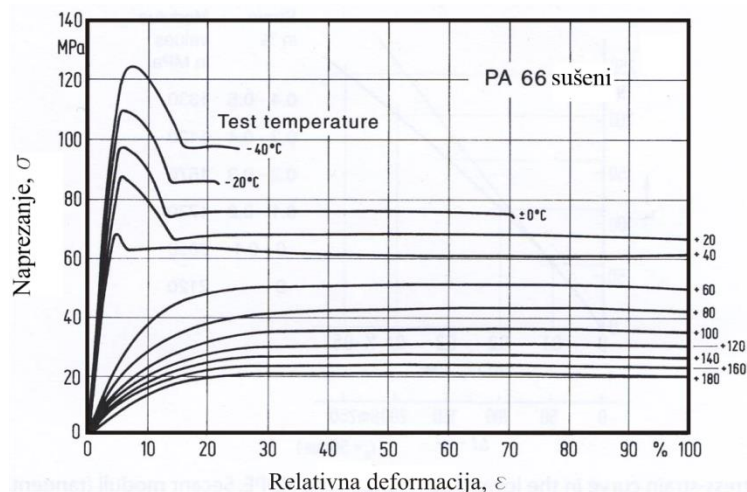
Slika 2.9 Viskoelastičnost polimernih materijala [6]

Pri niskim temperaturama poliamid reagira brzo i ima malu deformaciju (Slika 2.11). Temperatura je ispod temperature staklastog prijelaza T_g unutar *Burgerovog* modela prema izrazu 2.2. Prevladavajući je prvi član, što se očituje radom opruge G_1 , prema Slici 2.10. Povećanjem temperature iznad temperature staklastog prijelaza T_g , poliamid postaje mekaniji i povećava se udjel viskozne komponente (prigušni element η_2) i elastične komponente opruge G_2 , što se u ukupnoj deformaciji očituje prevladavanjem drugog člana u izrazu 2.2. Daljnjim rastom temperature dolazi do nepovratnog tečenja materijala uz malu elastičnost materijala, što je opisano prigušnom karakteristikom η_1 . U ukupnoj deformaciji prema izrazu 2.2, to je slučaj prevladavanja trećeg člana u *Burgerovom* modelu.



Slika 2.10 Burgerov reološki model [6, 56]

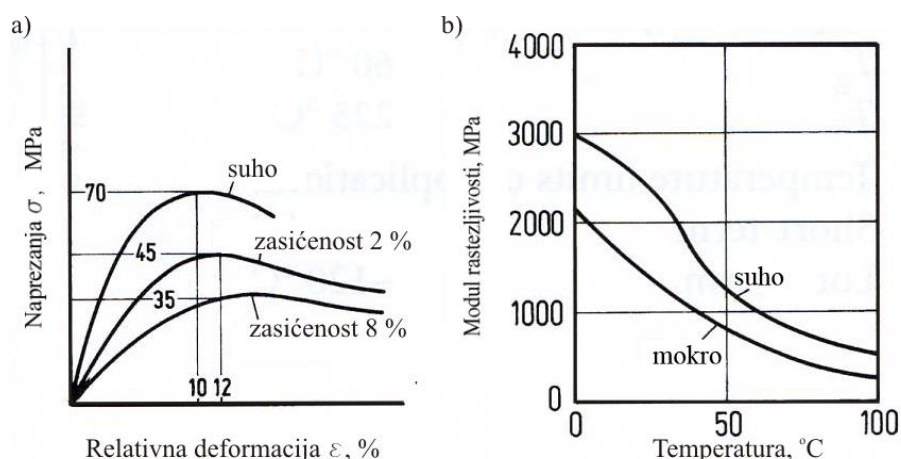
Tijekom deformiranja poliamida javljaju se sve tri kombinacije reakcija, ovisno o radnom stanju polimera. Ukupna reakcija je viskoelastična i nije je moguće jednostavno podijeliti na elastični i viskozni dio. Dok djelotvornost pojedinih mehanizama pri promatranoj temperaturi ovisi i o brzini djelovanja opterećenja, pri udarnom opterećenju ne dolazi do viskozne deformacije, dok kod dugotrajnog opterećenja prevladava viskozna deformacija koja se očituje kao puzanje (Slika 2.9).



Slika 2.11 Naprezanje i deformacije poliamida PA 66 pri različitim temperaturama [56]

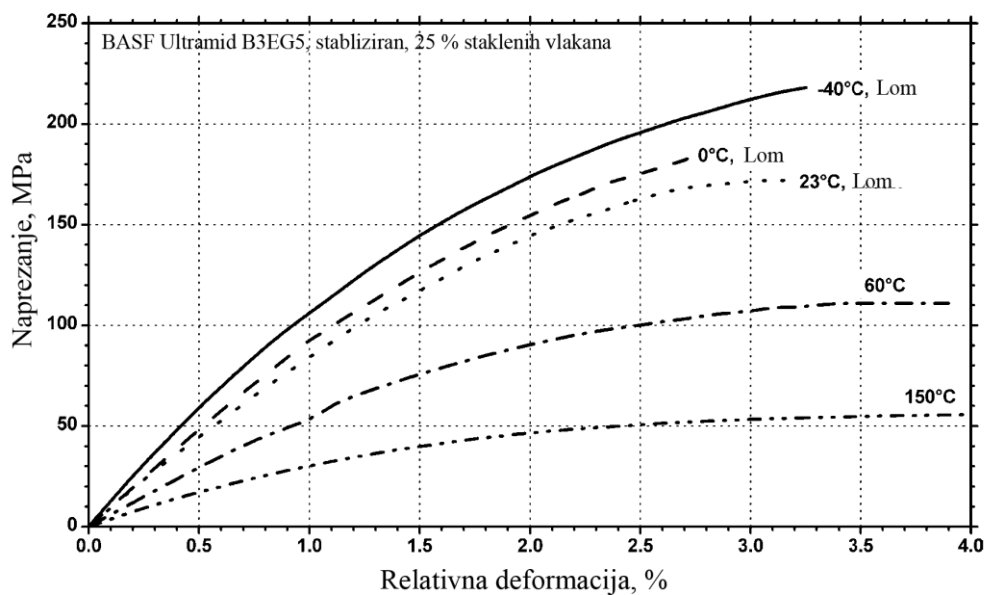
2.3 Mehanička svojstva poliamida

Apsorpcija vode ovisi o vrsti poliamida te se znatno razlikuje od poliamida do poliamida. Postotak apsorbirane vode u materijalu značajno utječe na mehaničke svojstva poliamida, primjerice kod poliamida PA 6 dolazi do povećanja deformacije za isto naprezanje u usporedbi poliamida PA 6 bez vode. Također se može vidjeti osjetan pad modula elastičnosti pri različitim temperaturama između mokrog i suhog poliamida (Slika 2.12).



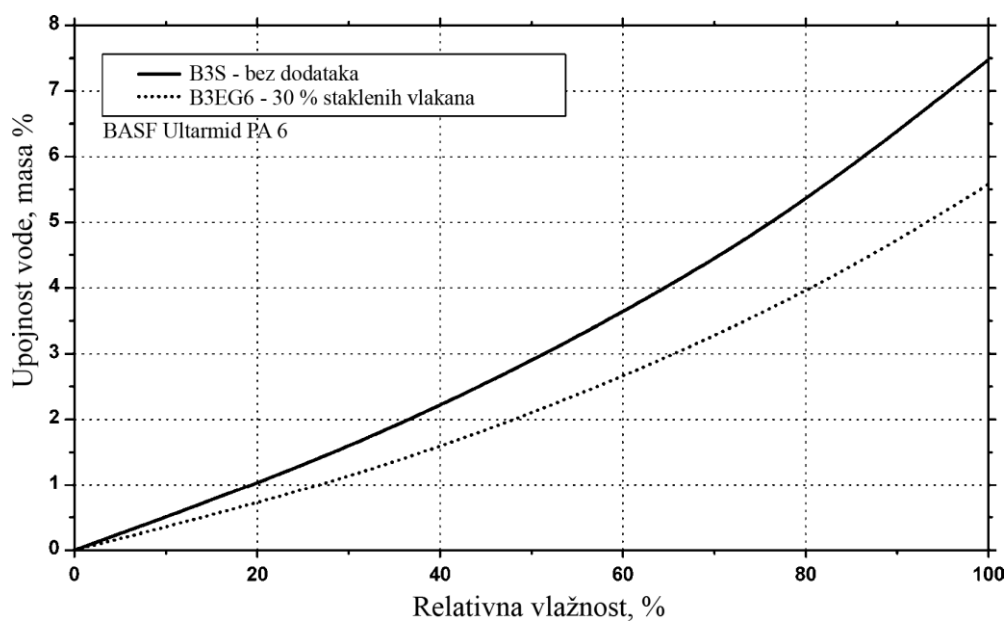
Slika 2.12 Dijagram: a) Deformacija i naprezanje, b) Modul rastezljivosti za PA 6 [56]

Dodavanjem dodatka osnovnom materijalu u obliku staklenih vlakana kod svih poliamida moguće je povisiti rasteznu čvrstoću uz manju deformaciju prema Slici 2.13. Povišenjem temperature dolazi do rasta deformacije te do loma ispitnog tijela.

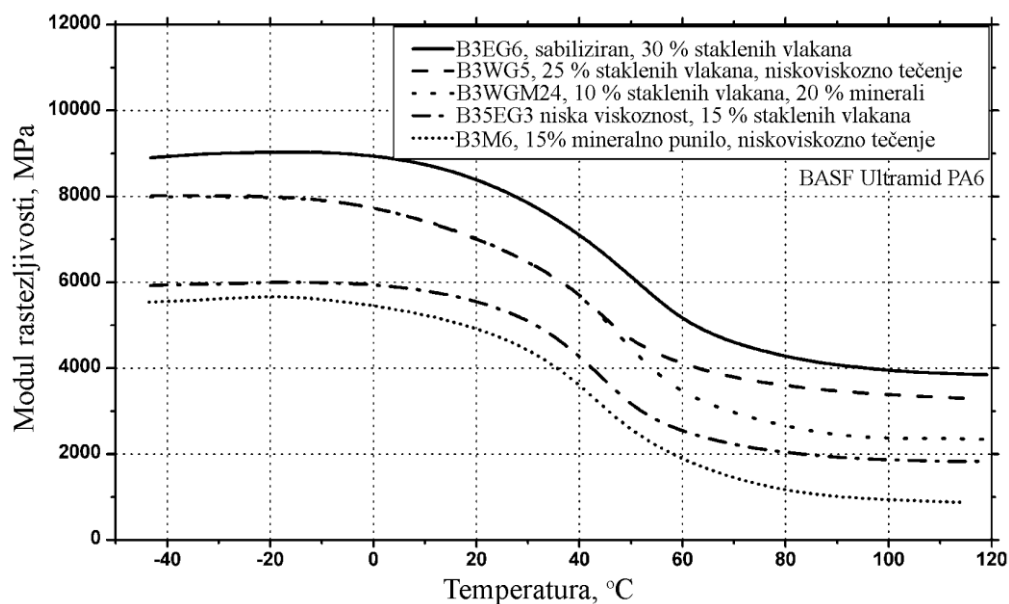


Slika 2.13 Dijagram ovisnosti naprežanja o deformaciji pri različitim temperaturama za PA 6 (DAM) [61]

Osim utjecaja na prekidno istezanje, staklena vlakna imaju i pozitivan utjecaj na apsorpciju vode, te je dodavanjem vlakana moguće smanjiti maksimalni sadržaja vlage u materijalu (Slika 2.14), što utječe na povišenje modula rastezljivosti u odnosu na povišenje temperature, Slika 2.15.



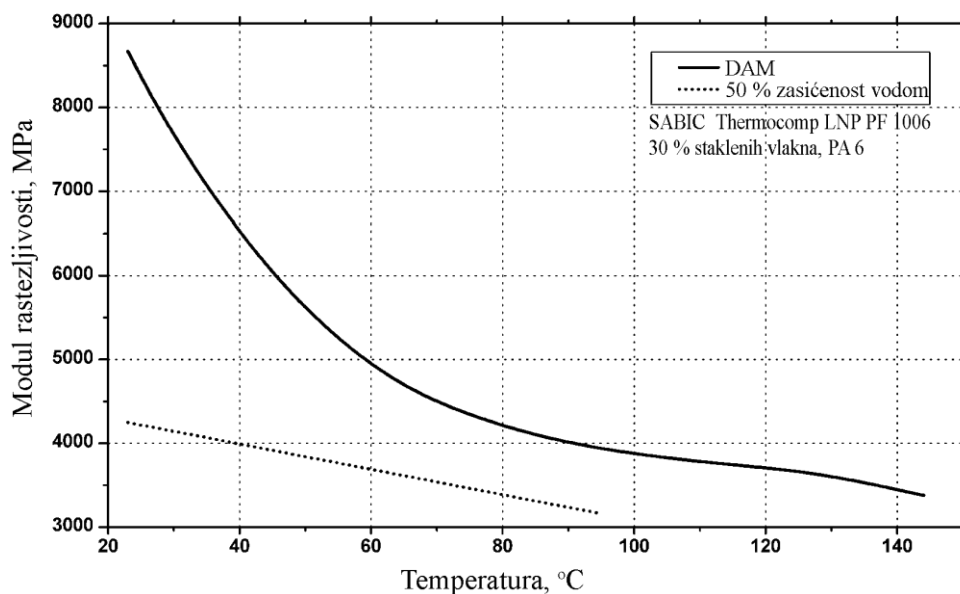
Slika 2.14 Upojnost vode prema relativnoj vlažnosti okoline za neke vrste poliamida PA [61]



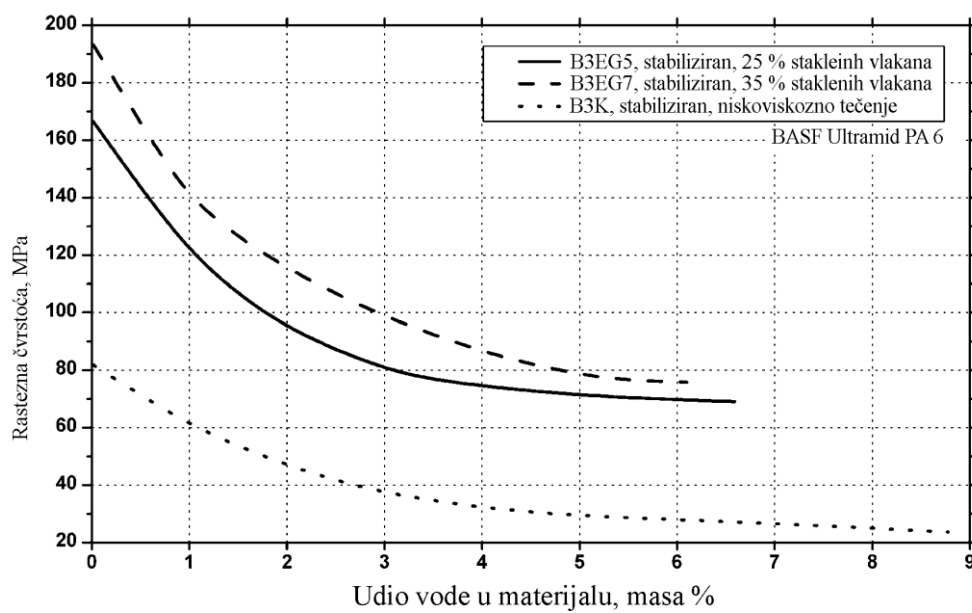
Slika 2.15 Ovisnost modula rastezljivosti za različite vrste poliamida PA 6 u zavisnosti od temperature [61]

Dodavanjem određenih dodataka osnovnom materijalu moguće je utjecati isto tako na modul elastičnosti, dok povećanje sadržaja vlage u materijalu dovodi do snižavanja modula elastičnosti (slika 2.16). U konačnici se povećanje sadržaja vode odražava na rasteznu čvrstoću materijala tako da povećanjem sadržaja vode u poliamidu, ovisno o dodatku osnovnom materijalu dolazi do osjetnog pada rastezne čvrstoće s povećanjem sadržaja vlage u materijalu, prema Slici 2.17. Na osnovi izloženog valja očekivati da će se granice opteretivosti poliamidnih zupčanika smanjivati s povećanjem udjela vode u materijalu i povećanjem temperature.

Mnogi autori opisivanjem polimera često daju raspodjelu veličina za materijale na radnoj okolini za sadržaj od 50 % relativne vlažnosti i temperaturi od 23 °C. Takvo stanje materijala nazivamo kondicionirano (*e. conditioned*), dok stanje materijala bez vode u materijalu nazivamo DAM (*e. dry as molded*).



Slika 2.16 Modul rastezljivosti u zavisnosti od temperature [61]



Slika 2.17 Rastezna čvrstoća poliamida PA 6 u zavisnosti o udjelu vode u materijalu [61]

Kvaliteta izrade polimernih zupčanika

Izradom zupčanika i montažom unose pogreške koje se klasificiraju kao odstupanja od nazivnih vrijednosti, odstupanja od idealnog oblika te odstupanje od položaja. Klasifikacijom zupčanika u 12 razreda kvalitete, odnosno definiranjem dopuštenih odstupanja od nazivnih mjera za svaku pojedinu kvalitetu prema DIN (Njemački institut za norme) te AGMA normi (Udruženje američkih proizvođača zupčanika) i drugih, zadovoljavaju se neke od osnovnih funkcija za kvalitetan rad prijenosnika. Mirnoća rada, buka, jednoliki prijenos gibanja, mogućnost podmazivanja, opteretivosti te zamjenjivost neke su od funkcija koje ovise o točnosti izrade zupčanika. Najvažnije norme iz kojih su proizišle i Hrvatske norme HRN M.C1.030 [63] za opisivanje odstupanja kod zupčanih prijenosnika su serija normi DIN 3961 - 3967 [64, 65, 66], gdje su definirana sva dopuštena odstupanja za pojedinu kvalitetu zupčanika te izradu i montažu prijenosnika.

3.1 Klasifikacija zupčanika prema DIN 3961

Dugotrajnim testiranjima zupčanika te izdavanjem norme DIN 3961 [64], postavljene su osnove određivanja kvalitete zupčanika. Kvalitete zupčanika postavljene su prema veličini modula zupčanika m i razredu promjera diobenih kružnica d . Izbor odgovarajuće kvalitete provodi se prema namjeni zupčanika kroz četiri podskupine:

- jednakomjeran prijenos gibanja (G),
- mirnoća rada i dinamička nosivost (L),
- statička nosivost (T),
- bez posebnih zahtjeva (N).

Svaka podskupina prema primjeni sadržava preporučene kontrole odstupanja zupčanika te nije potrebno kontrolirati ostale geometrijske parametre jer ne utječu značajno na kvalitetu rada za predviđenu namjenu. Prema [64] podjela funkcijskih skupina podijeljena je u tri razreda prema Tablici 3.1 koji se odnose na moguće varijante postupaka testiranja prema mogućnostima proizvođača (Tablica 3.2).

Zbog značajnog utjecaja postupaka izrade na točnost, polimerni zupčanci prema [15] mogu se izraditi u kvalitetama od 6 do 12. Prema Tablici 3.1 može se zaključiti da postoji mogućnost izrade polimernih zupčanika za sva područja primjene.

Tablica 3.1 Podjela kvalitete zupčanika prema skupinama primjene [64]

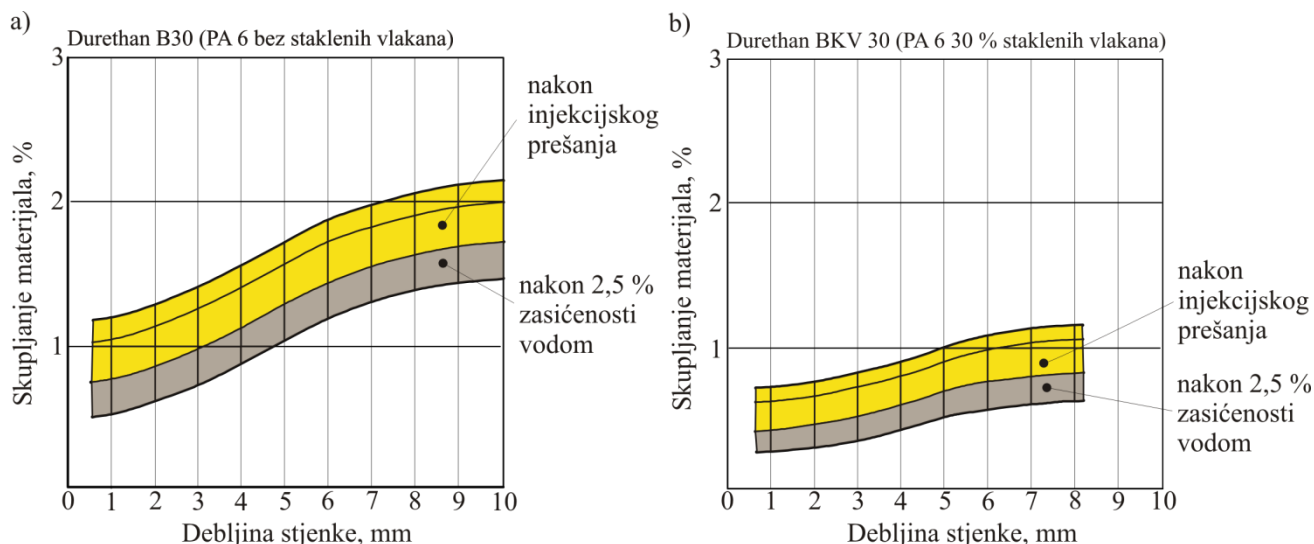
Funkcijska skupina	G Jednakomjeran prijenos gibanja			L Mirnoća rada i dinamička nosivost			T Statička nosivost			N Bez posebnih zahtjeva		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Kvaliteta zupčanika												
2	F_i', R_s			F_i', F_β	F_p, F_f, F_β		F_i', F_β	f_{pe}, F_f, F_β	f_{pe}, TRA	F_i', R_s	F_p, R_s, F_f, F_β	$f_{pe}, R_s, F_f, F_\beta$
3	F_i', R_s			F_i', F_β	F_p, F_f, F_β		F_i', F_β	f_{pe}, F_f, F_β	f_{pe}, TRA	F_i', R_s	F_p, R_s, F_f, F_β	$f_{pe}, R_s, F_f, F_\beta$
4	F_i', R_s	F_p, F_f, F_β		F_i', F_β	F_p, F_f, F_β	f_{pe}, F_f, TRA	f_{pe}, F_f, F_β	f_{pe}, TRA	F_i'', TRA	F_i', R_s	F_i', F_f, F_β	f_{pe}, R_s, TRA
5	F_i', R_s	F_p, F_f, F_β	f_{pe}, F_f, F_β	F_i', F_β	F_p, F_f, F_β	f_{pe}, R_s, TRA	f_{pe}, F_f, F_β	f_{pe}, TRA	F_i'', TRA	F_i', R_s	F_i', F_f, F_β	f_{pe}, R_s, TRA
6	F_i', R_s	F_p, F_f, F_β	f_{pe}, F_f, F_β	F_p, F_f, F_β	F_i'', F_f, F_β	f_{pe}, R_s, TRA	f_{pe}, F_f, F_β	f_{pe}, TRA	F_i'', TRA	F_i', R_s	F_i'', F_f, F_β	f_{pe}, R_s, TRA
7	F_p, F_f, F_β	f_{pe}, F_f, F_β	f_{pe}, F_β	F_p, F_f, F_β	F_i'', F_f, F_β	f_{pe}, R_s	f_{pe}, TRA	F_i'', TRA	f_p, TRA	F_i'', F_f, F_β	F_i'', TRA	f_{pe}, R_s
8	F_p, F_f, F_β	f_{pe}, F_f, F_β	f_{pe}, F_β	F_p, F_f, F_β	F_i', F_f, F_β	f_{pe}, R_s	f_{pe}, TRA	F_i'', TRA	f_p, TRA	F_i', F_f, F_β	F_i'', TRA	f_{pe}, R_s
9					F_i', F_f, F_β	f_{pe}, R_s	f_{pe}, TRA	F_i'', TRA	f_p, TRA	F_i'', TRA	F_i''	f_{pe}
10					F_i', F_f, F_β	f_{pe}, R_s	f_{pe}	f_i''	f_p	F_i'', TRA	F_i''	f_{pe}
11							f_{pe}	f_i''	f_p	F_i''	f_{pe}	R_s
12										F_i''	f_{pe}	R_s

Tablica 3.2 Testni postupci za geometrijska odstupanja zupčanika [64]

Simbol	Testni postupci	Zahtijevano u toleranciji
F_i	Kontrola ukupnog tangencijalnog odstupanja sprežanjem	F_i i f_i
f_i	Kontrola pojedinačnog tangencijalnog odstupanja sprežanjem	f_i
F_i''	Kontrola ukupnog radijalnog odstupanja sprežanjem	F_i'' , f_i'' , a (ako T_s nije proveden)
R_s	Kontrola odstupanja debljine zuba	R_s
TRA	Kontrola površine ležajeva	TRA
F_β	Kontrola pravca bočne linije	F_β
F_f	Kontrola profila zuba	F_f
F_p	Kontrola ukupnog odstupanja lučne duljine koraka	F_p , $F_{p\ z/8}$
f_p	Pojedinačna kontrola odstupanja koraka	f_p , f_u
f_{pe}	Kontrola odstupanja normalnog koraka zuba	f_{pe}

3.2 Utjecaj načina izrade i materijala na kvalitetu zupčanika

Izrada zupčanika od plastomera može se podijeliti na tri najčešća načina izrade, a to su injekcijsko prešanje, lijevanje, te obrada odvajanjem čestica od poluproizvoda. Izrada injekcijskim prešanjem je najisplativija kod velikih serija (više od 1000 komada) [5], dok je izrada lijevanjem najčešća kod zupčanika većih dimenzija. Izrada zupčanika obradom odvajanja čestica [67] daje najbolje rezultate s obzirom na točnost izrade te je tim načinom moguće postići najvišu kvalitetu izrade. Materijali koji se primjenjuju kod ovakve izrade, najčešće su čisti bez dodatka vlakana ili ojačala. Injekcijskim prešanjem postiže se najekonomičnija proizvodnja kod velikih serija te postoji značajan utjecaj parametara prerade na kvalitetu izrade zupčanika [52]. Prilikom hlađenja zupčanika, unutar kalupa dolazi do stezanja (*e. shrinkage*) materijala te je potrebno tu promjenu uzeti u obzir kod samog projektiranja alata. Na Slici 3.1 prikazana je promjena stezanja materijala u funkciji debljine, što unosi dodatno odstupanje zbog promjene debljine zuba. Dodavanjem dodatka osnovnom materijalu u obliku staklenih vlakana, smanjuje se stezanje materijala od 50 do 80% ovisno o materijalu, (Tablica 3.3). Prema [50] postoje značajne razlike u stezanju materijala ovisno o smjeru tečenja materijala. Prema Tablici 3.3 skupljanje u smjeru poprečno na smjer tečenja materijala veće je nasuprot skupljanja uzduž smjera tečenja.

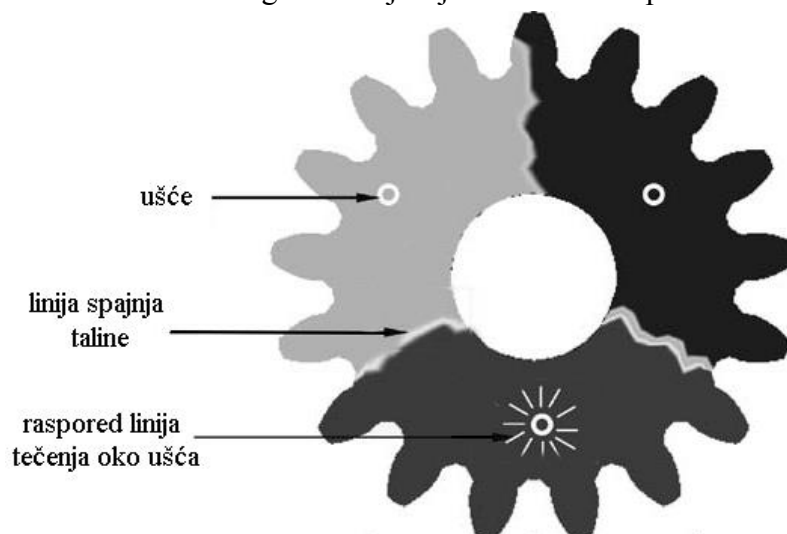


Slika 3.1 Skupljanje poliamida PA 6 u zavisnosti od debljine stijenke: a) bez staklenih vlakana, b) 30% staklenih vlakna [50]

Tablica 3.3 Stezanje različitih vrsta poliamida PA6 [50]

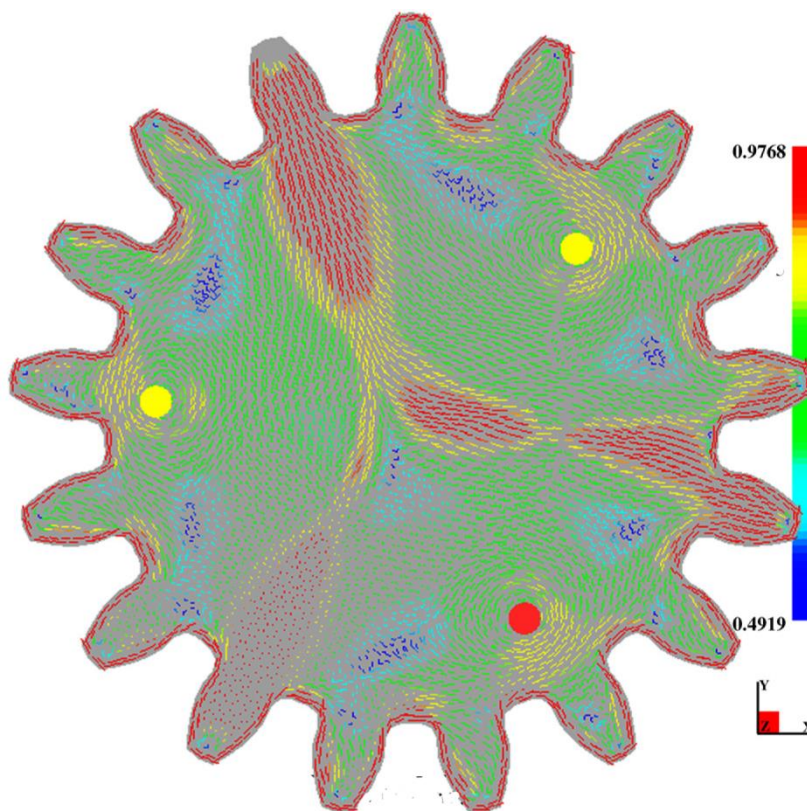
Materijal	Punilo	Stezanje, uzdužno/poprečno
PA 6; B30S (Durethan)	bez dodataka	1,0 / 1,2
PA 6; BM 240 H 2,0 (Durethan)	mineralno punilo	1,2 / 1,2
PA 6; BKV 30 H 2,0 (Durethan)	30 % staklena vlakna	0,2 / 0,8
PA 6; BG 30 X (Durethan)	15% globule / 25 % staklena vlakna	0,3 / 0,9

Dodavanjem staklenih vlakana osnovnom materijalu utječe se na skupljanje materijala (Slika 3.1) i na povećanje mehaničkih svojstava (Slika 2.17) što, u konačnici, može dati višu kvalitetu zupčanika i bolja mehanička svojstva. Tijekom izrade alata za injekcijsko prešanje prema kapacitetu stroja i veličini zupčanika, moguće je proizvesti više od jednog zupčanika i imati više od jednog ušća po zupčaniku. Prema [47, 48] povećanjem broja ušća dolazi do pojave linija spajanja prema Slici 3.2, što u konačnici ima negativan utjecaj na kvalitetu zupčanika.



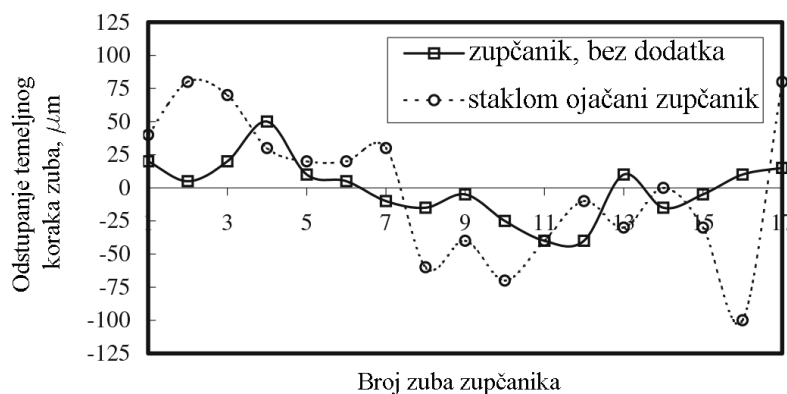
Slika 3.2 Linije spajanja kod injekcijskog prešanja [48]

Dolazi do bitno drukčijeg oblikovanja linija tečenja materijala i do pojave nejednolike usmjerenosti vlakana prema Slici 3.3. Smještajem ušća u područje središnje osi okomito na zupčanik, dobiva se jednaka usmjerenost vlakana i materijala u svim smjerovima, odnosno jednak raspored vlakana po cijelom zupčaniku.

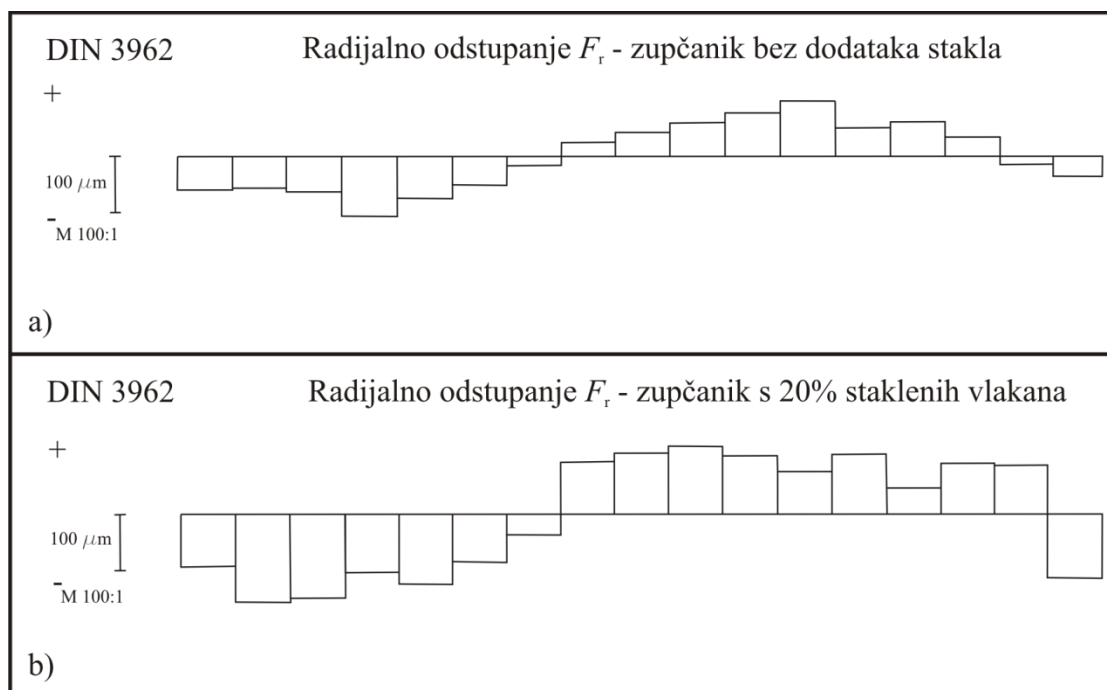


Slika 3.3 Simulacija usmjerenosti vlakana kod tri ušća tijekom injekcijskog prešanja [47]

Veći broj ušća ima pozitivan učinak na brzinu izrade i ekonomičnost proizvodnje. Mjerenjem odstupanja temeljnog koraka boka zuba f_p , prema Slici 3.4, može se primijetiti da rezultati kod zupčanika bez staklenih vlakana mjerenjem daju manje odstupanje od idealne linije, ovisno o zupčaniku sa staklenim vlaknima koji imaju veće odstupanje u području preklapanja linija tečenja, što im smanjuje kvalitetu ozubljenja. Mjerenja odstupanja evolvente boka zuba i bočne linije prema [47] potvrđuju tendenciju smanjenja kvalitete zupčanika kod zupčanika sa staklenim vlaknima i više ušća, što se odražava i na veće ukupno odstupanje pri radijalnom odstupanju zupčanika (Slika 3.5).



Slika 3.4 Odstupanje temeljnog koraka zuba - f_p kod zupčanika od PA 66 [48]



Slika 3.5 Radijalno odstupanje ozubljenja F_r , PA 66: a) bez dodatka stakla, b) sa 20% staklenih vlakna [47]

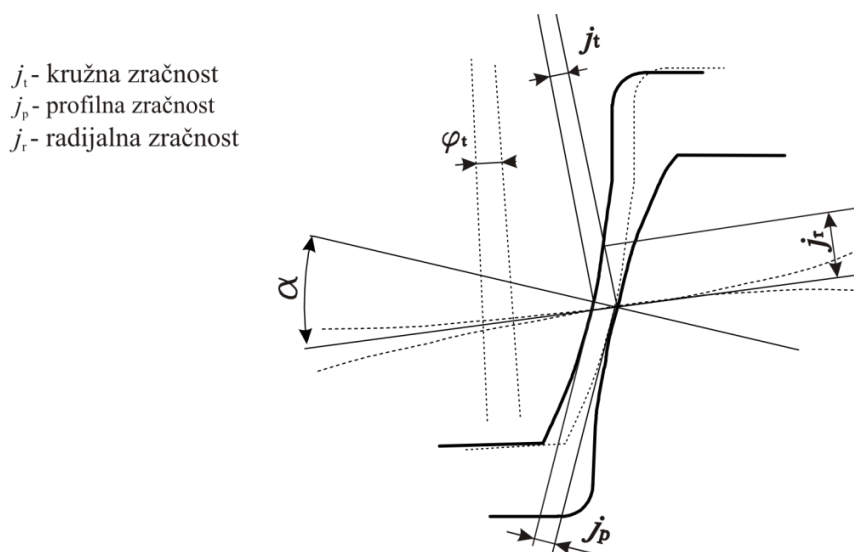
Obrada odvajanja čestica dolazi do izražaja kod pojedinačne proizvodnje polimernih zupčanika. Glava prednost takvog načina izrade zupčanika od polimernih materijala odnosi se na univerzalnost (identični postupci i alati za metalne zupčanike), te točnosti dobivene takvom obradom. Zupčanici dobiveni obradom odvajanja čestice izrađuju se iz poluproizvoda, najčešće je to trupac dobiven lijevanjem ili ekstrudiranjem. Rjeđe se rade poluproizvodi injekcijskim prešanjem da bi se nakon toga pristupalo obradi odvajanjem čestica. Poluproizvodi dobiveni ekstrudiranjem zbog načina izrade imaju linije tečenja materijala (usmjerenost lanaca makromolekula) raspoređene duž središnje linije trupca. Izradu ozubljenja poželjno je vršiti paralelno s linijom tečenja materijala, što povoljno utječe na dimenzijske promjene tijekom izrade. Ovisno od odabranog materijala problemi koje s javljaju kod takve izrade prvenstveno se odnose na odabrane režime obrade. Tijekom obrade dolazi do promjene temperature i dimenzija. Zbog elastičnosti samih polimernih materijala dolazi do unosa grešaka tijekom izrade. Širina zuba na početku i na kraju može biti različita ako se ne poštuje smjer odvajanja čestica, time se utječe se na povećanje odstupanja bočne linije zuba. Zbog velike sklonosti pojedinih polimera na promjenu dimenzija zbog temperature i sadržaja vode u materijalu često se provodi predobrada zupčanika prije završne izrade. Cilj predobrade je stabiliziranje dimenzija, to je moguće dobiti kondicioniranjem uzoraka (poglavlje 2.2.2) prema projektiranom okolišu upotrebe. Općenito vrijedi da polimerni zupčanici sa višim postotkom vode postaju stabilniji obzirom na promjenu dimenzija uslijed kolebanja temperature i mehaničke obrade odvajanjem čestica. Obradom odvajanjem čestica moguće je postići najviše kvalitete izrade polimernih zupčanika naspram ostalih tehnologija izrade. Zupčanici dobiveni ovakvom obradom obično su homogeniji po strukturi te samim time i promjene u dimenzijama su iste u svom smjerovima što se pozitivno odražava na dimenzijska odstupanja.

3.3 Bočna zračnost prema DIN 3967

Da bi postigli određenu funkcionalnost zupčanika potrebno je odrediti bočnu zračnost prema Slici 3.6 kojom će se osigurati nesmetan rad zupčastog para u zahvatu. Bočnom zračnosti

obuhvaćeno je odstupanje kod debljine zuba, uzdužne linije boka, koraka, razmaka osi i koncentričnosti. Odmicanjem ili primicanjem alata tijekom izrade zupčanika može se utjecati na iznos zračnosti, to jest, primicanjem alata smanjuje se bočna zračnost. Isti učinak povećanja ili smanjenja bočne zračnosti postiže se korekcijom razmaka osi, što se rjeđe primjenjuje kod metalnih zupčanika dok kod polimernih zupčanika ima više prednosti, posebice ako se rade polimerni zupčanci u velikim serijama. Ponekad je tehnološki lakše izraditi korekciju na kućištu nego modifikaciju alata zupčanika. Bočna zračnost može se izraziti kao kružna zračnost j_t na obodu kinematskih kružnica i kao profilna zračnost j_p (najmanja udaljenost dvaju susjednih bokova profila zuba spregnutih zupčanika), radijalna zračnost j_r proizlazi iz kružne zračnosti, prema izrazu 3.1 i daje iznos smanjenja osnog razmaka za sprezanje zupčanika bez bočne zračnosti [17].

$$j_r = \frac{j_t}{2 \cdot \tan \alpha} = \frac{j_p}{2 \cdot \sin \alpha} \quad (3.1)$$



Slika 3.6 Kružna zračnost

Izbor kružne zračnosti ne govori ništa o kvaliteti zupčanika, ali kvaliteta zupčanika utječe na iznos kružne zračnosti. Povećanjem kvalitete zupčanika utječe na manja dopuštena odstupanja u geometriji, a time i na manju potrebnu maksimalnu bočnu zračnost.

Prilikom izbora i proračuna bočne, odnosno kružne, zračnosti poželjno je poznavati funkciju prijenosnika. Najviše se razlikuju dvije skupine zupčanih parova:

- zupčanci za prijenos snage: polimerni zupčanci mogu biti prijenosnici manjih do srednjih snaga te tijekom rada dolazi do znatnih opterećenja, deformacija, zagrijavanja zupčanika;
- zupčanci za prijenos gibanja: polimerni zupčanci često su prijenosnici gibanja i malih snaga.

Tijekom rada zupčanika javlja se radna bočna zračnost koja je određena bočnom zračnošću, nastalom geometrijskim odstupanjima zupčanog para u sklopu s pogreškom osi vratila i zračnošću zupčanog para, nastalog zbog radnih uvjeta (deformacije zuba u zahvatu, promjene temperature, promjena vlage, zračnošću ležajeva itd). Prema aktualnoj normi [66] teoretska bočna zračnost sastoji se, prema izrazu 3.2, od odstupanja debljine zuba i odstupanja razmaka osi [68], dok se minimalna zračnost može izraziti preko dopuštenog odstupanja pri radijalnoj kontroli zupčanika [63] u zahvatu, prema izrazu 3.3. Zračnost prema, izrazu 3.2, često je u uporabi pri određivanju bočne zračnosti kod metalnih zupčanika općenite namjene, koji ne rade pri povišenim temperaturama.

$$j_t = -\frac{A_{sn1} - A_{sn2}}{\cos \beta} + 2 \cdot A_a \cdot \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} = -\sum A_{st} + \Delta j_a \quad (3.2)$$

$$j_{\min} > 2 \cdot (T_{i1}'' + T_{i2}'') \cdot \tan \alpha \quad (3.3)$$

Dodatni izrazi kojima se upotpunjuje izraz 3.2 odnose se na specifične zahtjeve glede ranih uvjeta. Izraz 3.2 moguće je proširiti na odstupanja nastala:

- porastom temperature;
- pogreškama na kućištu nastalih zbog neparalelnosti osi;
- pojedinačnim odstupanjima zuba zupčanika, nastalih izradom;
- stezanjem ili bubrenjem materijala;
- pozicioniranjem, oblikom i dimenzijskom devijacijom pojedinih komponenata;
- elastičnošću.

Promjena temperature utječe na promjenu bočne zračnosti prema izrazu 3.4, zavisno od koeficijenata toplinskog rastezanja te temperaturi pa može doći do povećanja ili smanjenja zračnosti. Utjecaj temperature obično se uzima u obzir za slučaj kad postoje različiti materijali zupčanika i kućišta u paru, odnosno kod značajnog utjecaja temperature na promjenu dimenzija.

$$\Delta j_{\vartheta} = \frac{m \cdot z_i}{2} \cdot (\Delta \vartheta_G \cdot \alpha_G - \Delta \vartheta_{zi} \cdot \alpha_{zi}) \cdot 2 \cdot \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \quad (3.4)$$

Odstupanja paralelnosti osi, predstavljaju odstupanja dvije komponente odstupanja, devijacije i inklinacije, prema [63]. Preveliko odstupanje u paralelnosti može dovesti do povećanja bočne zračnosti koja se računa prema izrazu 3.5.

$$\Delta j_{\Sigma \beta} = -f_{\Sigma \beta} \cdot \frac{b}{L_G} \quad (3.5)$$

Individualna odstupanja zuba računaju se prema izrazu 3.6 i odnose se samo na jedan zupčanik. Uzimaju se u obzir odstupanja bočne linije zuba, boka profila zuba i odstupanje koraka.

$$\Delta j_F = -\sqrt{\left(\frac{F_{\beta}}{\cos \alpha_t}\right)^2 + \left(\frac{F_f}{\cos \alpha_t}\right)^2} + f_p^2 \quad (3.6)$$

Stezanje i bubrenje materijala, prema [66], ima isti učinak kao i temperatura. Bubrenjem obično naziva se povećanje dimenzija dok je stezanje smanjenje dimenzija. Razlozi za bubrenje kod polimernih materijala su povišenje temperature ili vezanje vlage na polimer zbog promjene radne okoline. Prema [66], u izrazu 3.7, pretpostavlja se linearna promjena dimenzija od 1/3 relativne promjene apsorpcije vlage ω_{zi} u postocima od volumena, ako se uzima da su oba zupčanika od polimera. Općenito vrijedi pravilo da bubrenje materijala smanjuje bočnu zračnost, uz uvjet da je bubrenje zupčanika veće od bubrenja kućišta.

$$\Delta j_Q = \left(\frac{1}{3} \cdot \omega_{zi} \cdot \frac{m \cdot z_i}{2}\right) \cdot 2 \cdot \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \quad (3.7)$$

Odstupanja nastala pozicioniranjem, oblikom i dimenzijskom devijacijom pojedinih komponenata prijenosa, prema [66], uzimaju se preko izraza 3.8, ovisno o tome poznaju li se ostale komponente prijenosa (odstupanja osi kućišta, odstupanja kružnosti vratila itd.).

$$\Delta j_B = 2 \cdot A_x \cdot \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \quad (3.8)$$

Elastičnost polimernih materijala mnogo je veća nego kod metala. Osim ovisnosti o opterećenju postoji ovisnost i o temperaturi zupčanika te sadržaja vlage u materijalu. Prema dijagramu na Slici

2.11 za PA 66 može se uočiti porast deformacije s povišenjem temperature, a ista tendencija povećanja progiba s povišenjem temperature vrijedi za sve plastomere. Porastom sadržaja vlage u materijalu dolazi do povećanja žilavosti materijala i pada modula elastičnosti (Slika 2.12) što se manifestira kao povećanje deformacije za isto opterećenje kod materijala s višim postotkom vlage. Povišenje opterećenja, temperature i sadržaja vlage u materijalu manifestira se kao povišenje deformacije zuba što dovodi do povećanja bočne zračnosti. Odstupanja nastala zbog elastičnosti zuba uzimaju, se prema [66], u izračun ukupne bočne zračnosti.

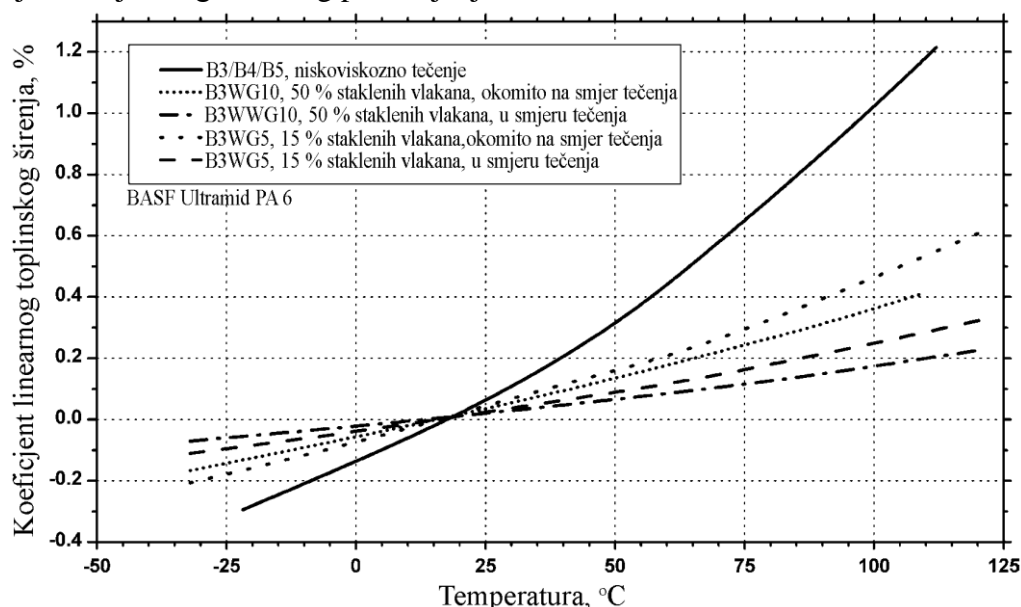
$$\Delta j_E = 2 \cdot f_k \cdot \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \quad (3.9)$$

3.4 Bočna zračnost kod polimernih zupčanika

Dimenzijska stabilnost polimernih zupčanika (poglavlje 2.2) posebice je ovisna o vrsti polimera te su zavisno od radnih uvjeta, potrebne veće bočne zračnosti nego kod metalnim zupčanika. Polimerni zupčanici za prijenos snage moraju, osim odstupanja debljine zuba i osnovnog razmaka, prema izrazu 3.2, sadržavati i odstupanja koja su posljedica radnih uvjeta i opterećenja.

3.4.1 Utjecaj temperature na bočnu zračnost

Tijekom prijenosa snage zbog trenja klizanja koje se javlja tijekom zahvata, dolazi do povišenja temperature zupčanika, što se odražava promjenom dimenzija prema izrazu 3.4. Odstupanja nastala promjenom temperature ovisna su ponajprije o sastavu polimernog materijala. Dodavanjem staklenih vlakana poliamidu (PA 6), prema Slici 3.7, može se utjecati na smanjenje toplinskog opterećenja zupčanika smanjenjem koeficijenta linearnog toplinskog širenja. Vrijednosti koeficijenata linearnog toplinskog širenja (Slika 3.7) padaju s dodavanjem staklenih vlakana kod svih poliamida. Postoje razlike u iznosu koeficijenata i prema smjeru tečenja materijala tako da će se javiti i veće odstupanje dimenzija u poprečnom smjeru na smjer tečenja materijala. S obzirom na smještaj ušća kod injekcijskog prešanja može se očekivati manje istežanje (prema Slici 3.2) na dijelovima spojnih linija zbog složenog postavljanja vlakna.



Slika 3.7 Koeficijenti linearnog toplinskog širenja za poliamid PA6 kod različitih sadržaja vlakana i linija tečenja materijala u zavisnosti od temperature [61]

Vrijednosti koeficijenta linearnog toplinskog širenja za PA 6 mijenjaju se od proizvođača do proizvođača te se kreću u iznosima oko $\alpha_{PA6} = 0.85 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ (BASF Ultramid B3L), dok se dodavanjem staklenih vlakana vrijednosti snižavaju $\alpha_{PA6GF15} = 0.75 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ (BASF Ultramid B35EG3) poprečno na smjer tečenja, dok su vrijednosti u smjeru tečenja materijala manje za isti materijal i iznose $\alpha_{PA6GF15} = 0.325 \cdot 10^{-4} / ^\circ\text{C}$. Dobivanje vrijednosti koeficijenta linearnog toplinskog širenja provodi se prema ASTM D696-03 (Američko društvo za materijale i ispitivanje materijala), i to često od strane proizvođača.

Za prijenos snage i gibanja često se upotrebljavaju različiti polimerni materijali kod zupčanika u paru. Zbog različitih koeficijenta linearnog toplinskog širenja svakog pojedinog zupčanika, potrebno je izraz 3.4 modificirati tako da sadržava koeficijente oba materijala, prema izrazu 3.10

$$\Delta j_{\theta z} = \Delta j_{\theta z1} + \Delta j_{\theta z2} \quad (3.10)$$

odnosno.

$$\Delta j_{\theta z} = [z_1 \cdot (\Delta \vartheta_G \cdot \alpha_G - \Delta \vartheta_{z1} \cdot \alpha_{z1}) + z_2 \cdot (\Delta \vartheta_G \cdot \alpha_G - \Delta \vartheta_{z2} \cdot \alpha_{z2})] \cdot m \cdot \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \quad (3.11)$$

$$\Delta j_{\theta z} = [\Delta \vartheta_G \cdot \alpha_G \cdot (z_1 - z_2) + (z_1 \cdot \Delta \vartheta_{z1} \cdot \alpha_{z1} - z_2 \cdot \Delta \vartheta_{z2} \cdot \alpha_{z2})] \cdot m \cdot \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \quad (3.12)$$

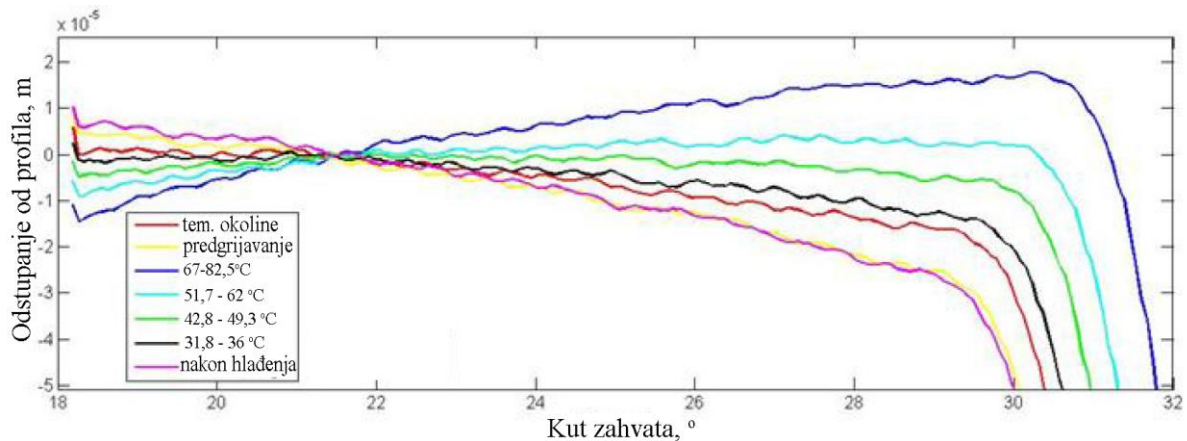
Ako su zupčanici u paru od istog materijala te rade pri istim temperaturama izraz 3.4 može se napisati prema 3.13

$$\Delta j_{\theta z} = (\Delta \vartheta_G \cdot \alpha_G - \Delta \vartheta_z \cdot \alpha_z) \cdot a \cdot 2 \cdot \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \quad (3.13)$$

Poznavanjem koeficijenta promjene dimenzije poradi promjene temperature [15] prema BS 6168 moguće je radijalno odstupanje zbog temperature prikazati prema izrazu 3.14.

$$\Delta j_{\theta z} = \frac{m \cdot z_1}{2} \cdot (\Delta_{th \max 1} - \Delta_{th \text{isp}1}) + \frac{m \cdot z_2}{2} \cdot (\Delta_{th \max 2} - \Delta_{th \text{isp}2}) - a \cdot \Delta \vartheta_G \cdot \alpha_G \quad (3.14)$$

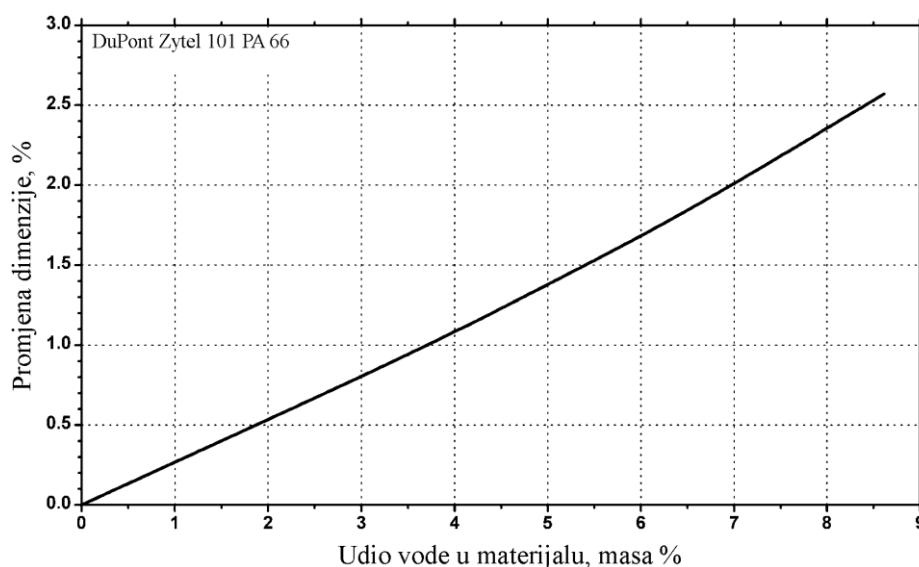
Prema [69], može se vidjeti da odstupanje evolvente od idealnog profila (Slika 3.8), nastalog povišenjem temperature ukazuje na povećanja debljine zuba pri višim temperaturama, posebice u području visine tjemena zuba.



Slika 3.8 Odstupanje profila boka zuba pri različitim temperaturama [69]

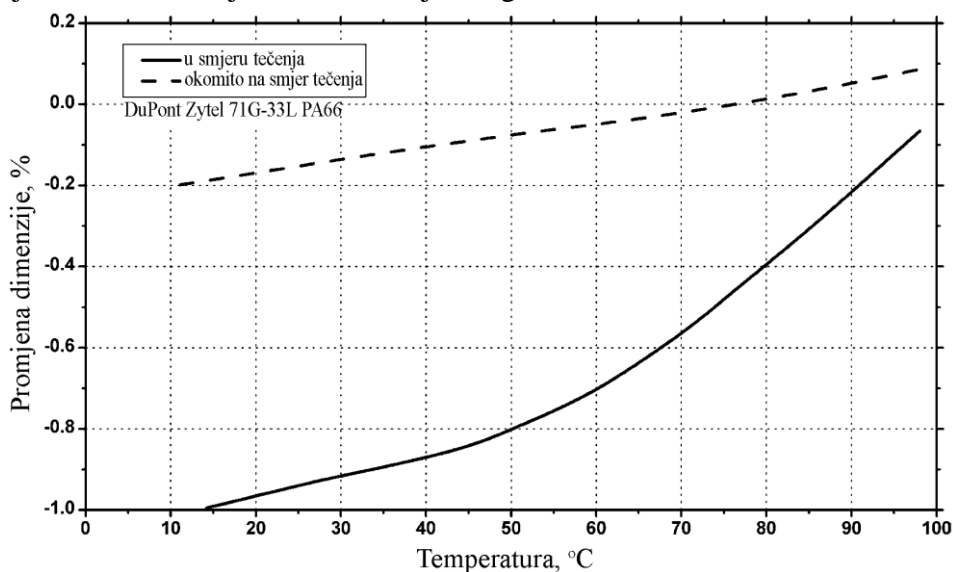
3.4.2 Utjecaj vlage na bočnu zračnost

Promjena radnih uvjeta osim opterećenja i temperature, može se odnositi i na promjenu relativne vlažnosti u zraku. Prema prethodno objašnjenim mehanizmima u poglavlju 2.2, apsorpcija vode kod poliamida izaziva promjenu mehaničkih svojstava (poglavlje 2.2.3). Dolazi do povećanja mase vezanjem molekula vode u strukturu poliamida, što se manifestira kao bubrenje, odnosno povećanje dimenzije. Ovisno o sadržaja vlage u PA 66 (Slika 3.9) dolazi do promjene dimenzija u svim smjerovima. Kod zupčanika se povećava širina zuba i dolazi do povećanja tjemnog promjera zupčanika.



Slika 3.9 Promjena dimenzije u ovisnosti od udjela vode u materijalu PA 66 [61]

Primjenom materijala s dodacima staklenih vlakana, dolazi do znatne razlike u smjeru i širenja materijala s obzirom na smjer tečenja materijala kod izrade (Slika 3.10). Uspoređujući utjecaj temperature s utjecajem vode na promjenu dimenzija, može se uočiti sličnost u tendenciji izlaznih veličina te interakciji s dodavanjem vlakana osnovnom materijalu. Određivanje apsorpcije vode u materijalu zupčanika provodi se prema normi HRN EN ISO 62 [70]. Primjenom izraza 3.7 dobiva se udjel u ukupnoj bočnoj zračnosti, nastao bubrenjem materijala za jedan zupčanik, s pretpostavkom o jednakim koeficijentima istezanja zbog vode.



Slika 3.10 Promjena dimenzije prema promjeni vlažnosti zraka kod poliamida PA 66 s 33% udjela vlakana [61]

U slučaju različitih materijala zupčanika u paru izraz 3.7 potrebno je preformulirati.

$$\Delta j_Q = \Delta j_{Qz1} + \Delta j_{Qz2} \quad (3.15)$$

$$\Delta j_Q = \frac{1}{3} \cdot m \cdot [(\omega_{z1} \cdot z_1) + (\omega_{z2} \cdot z_2)] \cdot \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \quad (3.16)$$

Odnosno za slučaj kada su oba zupčanika od istog materijala izraz 3.7 glasi

$$\Delta j_Q = \frac{1}{3} \cdot m \cdot \omega_z \cdot (z_1 + z_2) \cdot \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \quad (3.17)$$

Za slučaj kad metalni i polimerni zupčanici rade u paru, nije potrebno uzimati odstupanje zbog bubrenja za metalni zupčanik zbog zanemarive promjene u odnosu na polimerni zupčanik te je moguće primijeniti izraz 3.7. Često u praksi nepoznato je kolika će biti relativna apsorbirana voda u materijalu tijekom rada prema početnom stanju, ali je potrebno pretpostaviti razliku vlažnosti zraka i vlažnosti kod izrade, pa je moguće, prema [15], izraz 3.7 preformulirati

$$\Delta j_{Qz} = [z_1 \cdot (\Delta_{hy \max 1} - \Delta_{hy \text{ isp} 1}) + z_2 \cdot (\Delta_{hy \max 2} - \Delta_{hy \text{ isp} 2})] \cdot m \cdot \frac{\tan \alpha_n}{\cos \beta} \quad (3.18)$$

Kod polimernih materijala koji nisu skloni promjeni dimenzija zbog apsorpcije vode, odnosno ne apsorbiraju vodu moguće je zanemariti dio bubrenja kod izračuna ukupne bočne zračnosti. U Tablici 3.4 može se vidjeti usporedba dva najčešća materijala za izradu polimernih zupčanika te usporedba promjene dimenzija prema zasićenost mase u vodi na 23 °C.

Tablica 3.4 Promjena dimenzije prema zasićenosti PA 66 i POM polimera

Polimer	Promjena dimenzije [%]	Zasićenje mase [%], u vodi pri 23°C
Poliamid PA 66 DuPont Zytel 101	1,87	8,5
Poli(oksi-metilen) POM Hostaform C 9021	0,7	1,6

3.4.3 Deformacija zuba i utjecaj na bočnu zračnost

Modul elastičnosti polimernih materijala mnogo je manji od modula elastičnosti čelika te zbog toga tijekom prijenosa snage i momenta dolazi do povećane deformacije zuba polimernog zupčanika. Prema izrazu 3.19, deformacija zuba računa se prema nazivnom linijskom opterećenju F_{Nt} gdje su Ψ_1 , Ψ_2 i φ_z faktori deformacije zuba prema [56, 5]. Potrebno je uzeti u obzir temperaturu boka zupčanika u radu kao temperaturu za određivanje modula elastičnosti (Slika 2.15) te utjecaj vlažnosti radne okoline.

$$f_k = \frac{1,5 \cdot F_{Nt}}{b \cdot \cos \alpha} \cdot \varphi_z \cdot \left(\frac{\Psi_1}{E_1} + \frac{\Psi_2}{E_2} \right) \quad (3.19)$$

Povećanje deformacije zuba izaziva odstupanja u koraku zuba, što se odražava kao povećanje buke tijekom rada. Ujedno preveliko opterećenje i povišena temperatura mogu dovesti do deformacije zuba, odnosno pojave viskoelastičnosti zuba (poglavlje 2.2.3). Iskustvene vrijednosti pokazale su da deformacija zuba iznad 0.4 mm izaziva povećanje buke te da je dobro deformaciju držati u granicama od $f_k < 0.1 \cdot m$ zbog deformacije koja se javlja kao naprezanje u korijenu zuba.

Deformacija zuba utječe na ukupno povećanje bočne zračnosti tijekom rada. Tijekom projektiranja zupčanika za prijenos gibanja zbog zanemarljivog opterećenja, nije potrebno uzimati utjecaj deformacije zuba na ukupnu bočnu zračnost zuba. Kod prijenosnika snage zbog težih radnih uvjeta koji se javljaju kao posljedica opterećenja, uzima se deformacija zuba prema izrazu 3.9 kao komponenta ukupne potrebne zračnosti.

3.5 Bočna zračnost prema funkciji polimernih zupčanika

Osnovna podjela funkcije zupčanika, prema izrazu 3.2, na zupčanike za prijenos malih i srednjih momenata te zupčanike za prijenos gibanja i vrlo malih momenata kod konstruiranja polimernih zupčanika, utječe na izbor zračnosti. Određivanjem kvalitete zupčanika te izborom tolerancijskog polja prema namjeni zupčanika [66, 64], poznaje se zbroj odstupanja preko spregnutih zupčanika A_{ste} i A_{sti} , a bočnu zračnost moguće je dobiti prema izrazima 3.20 i 3.21.

$$\Delta j_{t \min} = (\Delta j_{\theta}) + (\Delta j_Q) + (\Delta j_E) - \sum A_{ste} - \sqrt{\Delta j_a^2 + \Delta j_{\Sigma \beta}^2 + \Delta j_{F1}^2 + \Delta j_{F2}^2 + \Delta j_B^2} \quad (3.20)$$

$$\Delta j_{t \max} = (\Delta j_{\theta}) + (\Delta j_Q) + (\Delta j_E) - \sum A_{sti} \pm \sqrt{\left| -\Delta j_a^2 + \Delta j_{\Sigma \beta}^2 + \left(\frac{\Delta j_{F1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta j_{F2}}{2}\right)^2 - \Delta j_B^2 \right|} \quad (3.21)$$

Bočna zračnost, prema preporuci norma DIN 3961-3967 [64, 65, 68, 66] te povučene norme VDI 2545 (Udruga njemačkih inženjera) izražena je preko kvalitete zupčanika, radijalnog odstupanja te odstupanja zbog temperaturnog povećanja dimenzija i grešaka prilikom montaže (ležajevi, itd.), prema [71].

3.5.1 Prijenos gibanja

Prijenos gibanja najčešća je funkcija polimernih zupčanika. Tijekom rada takvih zupčanika može se zanemariti povišenje temperature na bokovima zuba zbog opterećenja, a isto tako zanemaruje se i deformacija zuba koja je funkcija opterećenja. Prilikom izračuna odstupanja zbog promjene temperature okoline, potrebno je uzeti u izračun razliku temperature okoline koja se očekuje tijekom radnog vijeka zupčanog para.

Poznavanjem geometrije i debljine zupčanika te udaljenosti zupčanika od ležajeva za polimerne zupčanike, moguće je uzeti u obzir devijaciju i inklinaciju zupčanog para. Devijacija ima veći utjecaj na ukupnu pogrešku neparalelnosti vratila nego inklinacija. Kod visokih zahtjeva za kvalitetom prijenosa te u slučaju dužih polimernih vratila bez naknadne obrade, poželjno je prilikom izračuna uzeti u obzir bočne zračnosti i odstupanja paralelnosti osi. Kod manje zahtjevnih primjena bez posebnih zahtjeva za preciznošću, moguće je zanemariti odstupanje paralelnosti.

Promjena relativne vlažnosti u radnoj okolini prijenosnika, na dulje vremensko razdoblje, može utjecati na iznos bočne zračnosti te je potrebno taj utjecaj uzeti kod izračuna bočne zračnosti. Poznavanjem geometrije kućišta i tolerancija oblika i položaja te kod zračnosti ležajeva u slučaju kada postoji potreba za posebno ujednačenim prijenosom gibanja, uzima se u izračun ukupne bočne zračnosti i odstupanje pozicioniranjem, oblikom i dimenzijskom devijacijom pojedinih komponenata, važnih za točan prijenos gibanja. Za ostvarivanje prijenosa gibanja polimernih zupčanika kod rada pri različitim vlažnostima radne okoline i konstantnoj temperaturi, može se dati sljedeći izraz.

$$\Delta j_{t \min} = (\Delta j_Q) - \sum A_{ste} - \sqrt{\Delta j_a^2 + \Delta j_{F1}^2 + \Delta j_{F2}^2 + \Delta j_B^2} \quad (3.22)$$

$$\Delta j_{t \max} = (\Delta j_Q) - \sum A_{sti} \pm \sqrt{\left| -\Delta j_a^2 + \left(\frac{\Delta j_{F1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta j_{F2}}{2}\right)^2 - \Delta j_B^2 \right|} \quad (3.23)$$

Ako je izraz ispod korijena negativan treba zbrojiti odstupanja, a ako je pozitivan primjeniti oduzimanje [66].

3.5.2 Prijenos snage i okretnog momenta

Prijenos snage kod polimernih zupčanika nije tako čest kao prijenos gibanja. Nedovoljnom istraženošću područja te nedostatak odgovarajućih normi usporava primjenu polimernih zupčanika kod prijenosnika snage. Prenosivi okretni momenti polimernih zupčanika višestruko su manji naspram metalnih zupčanika te se polimerni zupčanci primjenjuju kod prijenosa srednjih i malih snaga. Izbor odgovarajuće zračnosti kod prijenosnika snage zbog povećanja temperature poradi trenja, potrebno je uzeti u obzir. Temperatura na boku zuba zbog promjene zahvata je trenutna (blich) temperatura i vrijednosti su obično više od temperature tijela zupčanika. Dugoročna izloženost povišenoj vlazi, odnosno razlika vlažnosti zupčanika tijekom rada i za vrijeme izrade mogu imati utjecaj na zračnost. Deformacija zupčanika ovisna je o opterećenju te povišenjem temperature dolazi do povišenja deformacije, a izračun deformacije provodi se prema temperaturi tijela zupčanika i za predviđenu razliku vlažnosti tijekom životnog vijeka. Može se stoga izraziti 3.20 i 3.21 primijeniti kod izračuna radne bočne zračnosti. Prevelike zračnosti dovode do povećanje udarnih opterećenja kod promjene smjera vrtnje te do povećanja buke u prijenosniku. Kod projektiranja prijenosnika snage u normalnoj uporabi za općenito strojarstvo prema normi DIN 3967 [66], obično se uzima da je $\Delta j_Q = \Delta j_E = \Delta j_B = 0$ kod metalnih zupčanika. Zbog, ponekad, ne tako zanemarivog utjecaja temperature na dimenzije može se reći da vrijedi $\Delta j_E = \Delta j_B = 0$.

$$\Delta j_{t \min} = (\Delta j_\theta) + (\Delta j_Q) + (\Delta j_E) - \sum A_{ste} - \sqrt{\Delta j_a^2 + \Delta j_{\Sigma\beta}^2 + \Delta j_{F1}^2 + \Delta j_{F2}^2} \quad (3.24)$$

$$\Delta j_{t \max} = (\Delta j_\theta) + (\Delta j_Q) + (\Delta j_E) - \sum A_{sti} \pm \sqrt{\left| -\Delta j_a^2 + \Delta j_{\Sigma\beta}^2 + \left(\frac{\Delta j_{F1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta j_{F2}}{2}\right)^2 \right|} \quad (3.25)$$

Eksperimentalno ispitno postolje i mjerna oprema

Nedostatak iskustvenih vrijednosti kod polimernih zupčanika te slaba pokrivenost normi za većinu novijih polimernih materijala za izradu zupčanika, nepoznavanje granica opteretivosti te podrobnija analiza temperatura zupčanika u radu, zahtijevaju ispitivanje prijenosnika u specijaliziranim uređajima. Ispitivanja zupčanika u radu provode se na uređajima sa zatvorenim ili otvorenim tokom snage. Vrijedi općenito za zupčanike da se na takvim uređajima mogu raditi ispitivanja čvrstoće korijena i bokova zuba te uvjeti podmazivanja.

U ovom poglavlju opisano je ispitno postolje zasnovano na uređajima s mehaničkim zatvorenim tokom snage [72], opteretivosti maksimalnog momenta od $T = 50 \text{ Nm}$. Ispitno postolje prema Slici 4.1 razvijeno je u *Laboratoriju za elemente strojeva FSB*-a na osnovi iskustava u sklopu istraživanja [73, 74]. Osnovne karakteristike ispitnog postolja (Slika 4.1) uključuju mogućnost kontinuirane promjene smjera i brzine vrtnje visoke točnosti, mogućnosti točnog pozicioniranja kuta, raspona brzina do $n_i = 5000 \text{ min}^{-1}$, mjerenja temperature unutar kućišta, mjerenja temperature na bokovima zuba zupčanika u zahvatu, mjerenja torzionih vibracija gonjenog zupčanika, kontinuiranog mjerenja ispitnog momenta, mjerenja brzine vrtnje gonjenog zupčanika i mjerenja dovedenog momenta.



Slika 4.1 Ispitni postav primijenjen u eksperimentalnom dijelu istraživanja

4.1 Ispitno postolje

Ispitno postolje prema Slici 4.2 korišteno je u provedbi ispitivanja, a razvijeno je u *Laboratoriju za elemente strojeva FSB-a*. Ovakvi uređaji ulaze u skupinu ispitnih uređaja sa zatvorenim tokom snage, a najveća im je prednost smanjenje potrebne snage pri ispitivanju prijenosničkih parova te lako uspostavljanje i promjena opterećenja uz konstantno održavanje momenta tijekom rada. Stvarni izgled dan je na Slici 4.2, a shematski prikaz na Slici 4.3.

Za provedbu ispitivanja potrebna su dva para zupčanika. Zupčanici (Z_1) i (Z_3) spojeni su preko kardanskog vratila (V_1), a zupčanici (Z_2) i (Z_4) preko mjernog vratila (MV) i kardanskog vratila (V_2). Uređaj je izveden tako da je kućište (K_2) učvršćeno na podlogu, dok se izvedbom kućišta (K_1), sa zupčanicama (Z_1) i (Z_2), omogućuje zaokret kućišta oko središta osnog razmaka, prema Slici 4.3. Poznato je da je kućište prijenosnika opterećeno zbrojem okretnih momenata na ulaznom i izlaznom vratilu te se opterećenje zupčastih parova može ostvariti dodavanjem okretnog momenta kućištu [72]. Zakretanjem kućišta (K_1) oko središta osnog razmaka, omogućuje se unos vanjskog momenta u sustav, odnosno time se postiže ravnoteža vanjskog momenta s reaktivnim momentom uvijenih vratila i drugih dijelova uređaja. Moment uvijanja u sustav, unosi se preko poluge dužine L i utega G . Određivanje momenta koji se unosi u sustav prema zadanim geometrijskim veličinama, prema Slici 4.3, može se odrediti iz izraza 4.1 ili mjerenjem preko mjernog vratila (MV).

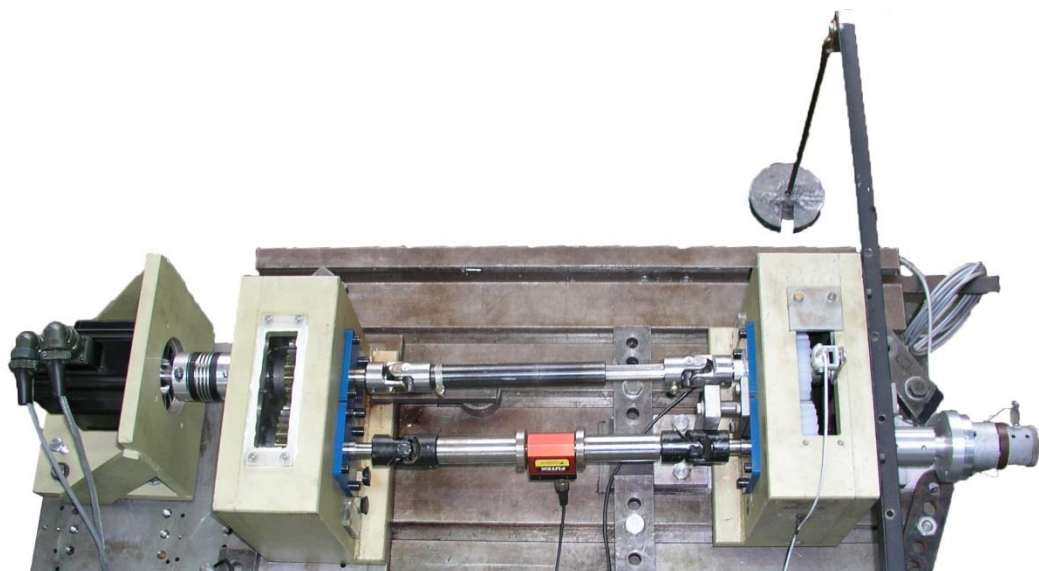
$$T_i = \frac{L \cdot r}{0.5 \cdot a} \cdot (G + F_k) \quad (4.1)$$

Unošenjem okretnog momenta u sustav javljaju se otpori nastali zbog sila trenja te deformacijskog rada pri sprezanju, pa je za svladavanje tih otpora potrebno dovesti dodatnu snagu. Snaga se dovodi putem pogonskog stroja (SM) i elastične spojke (KS) na vratilo zupčanika (Z_3). Pogonski stroj može biti asinkroni ili sinkroni elektromotor, a za potrebe ovog ispitivanja izabran je sinkroni motor.

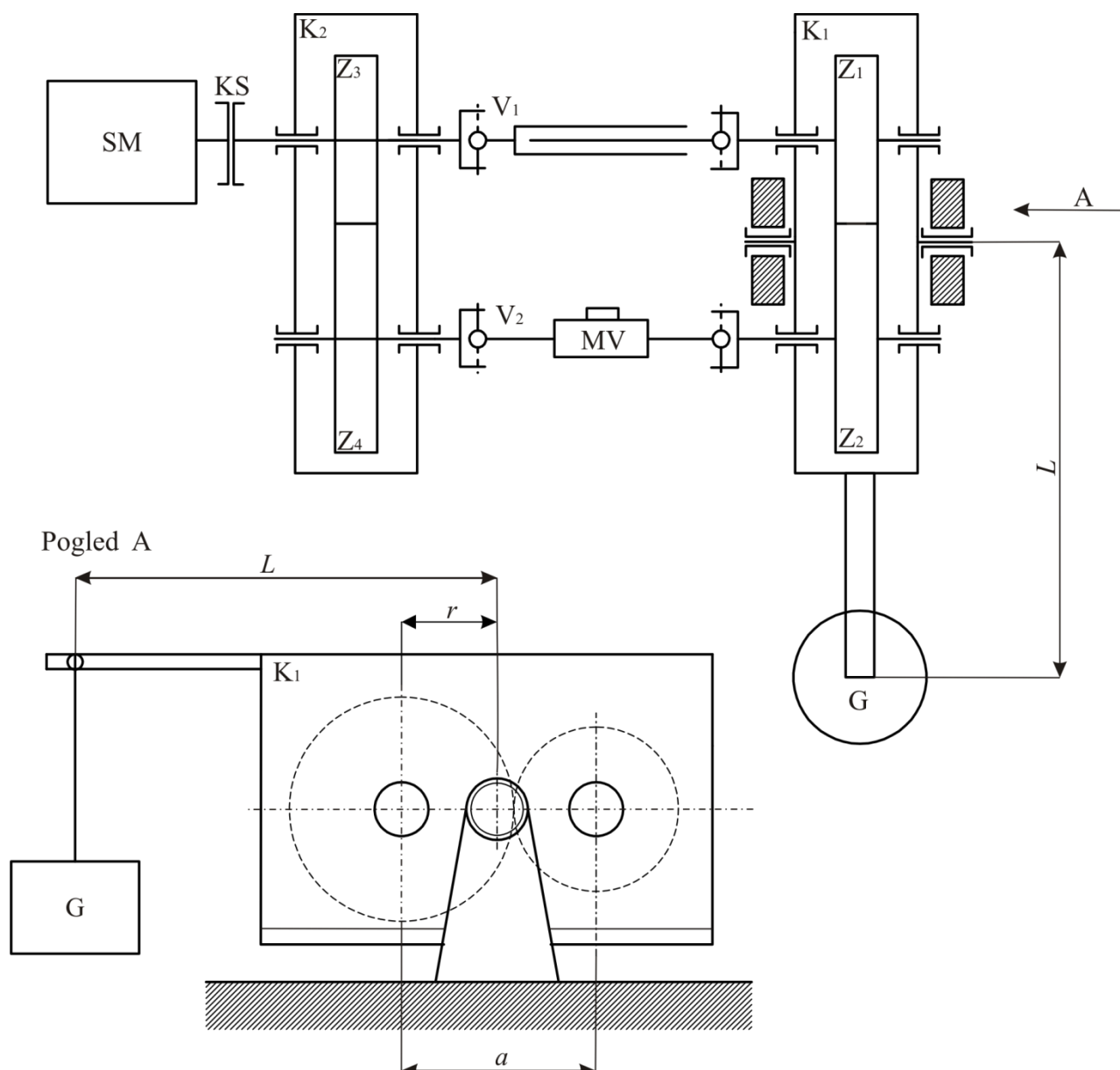
Zbog relativno malih otpora unutra sustava, nastalih radi sila trenja i deformacije, pogonski moment radnog stroja može biti višestruko manji od zarobljenog moment u ispitnom krugu, što je ujedno jedna od osnovnih prednosti zatvorenog toka snage. Poznavanjem unesenog okretnog momenta te brzine vrtnje radnog stroja i momenta gubitaka T_v potrebnih za svladavanje gubitaka unutar sustava, prema Slici 4.4, može se prikazati smjer toka snage P koji kruži sustavom i snage koja se gubi za slučaj da se smjer okretanja poklapa sa smjerom unesenog momenta. Mjerenje momenta otpora može se ostvariti dodavanjem još jednog mjernog vratila (MV) nakon radnog stroja ili izravnim mjerenjem izlaznih veličina na sinkronom motoru (poglavlje 4.2). Snaga koju je potrebno dovesti za pokrivanje gubitaka u kruga može se dobiti iz izraza 4.2, dok stupanj iskorištenja ispitnog prijenosnika [72] može se odrediti prema izrazu 4.3.

$$P_v = T_v \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_1 \quad (4.2)$$

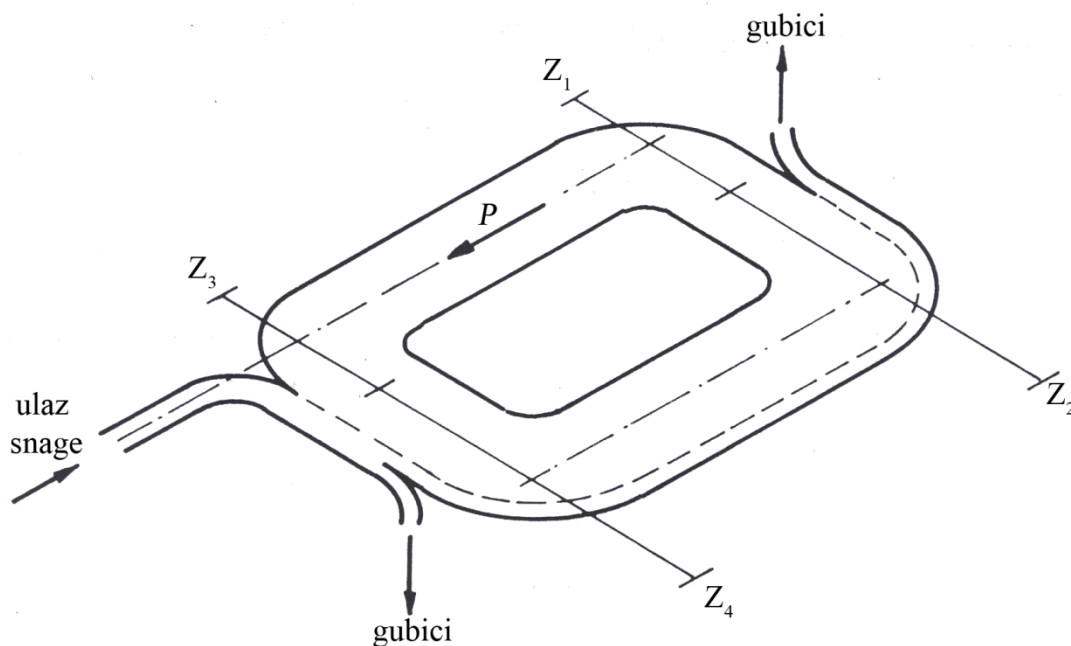
$$\eta_p = \sqrt{\frac{T_i}{T_i + T_v}} \quad (4.3)$$



Slika 4.2 Postolje za ispitivanje granica opteretivost i trošenja polimernih zupčanika



Slika 4.3 Shema postolja za ispitivanje polimernih zupčanika



Slika 4.4 Shema cirkulacije snage kod uređaja s mehaničkim zatvorenim tokom snage

4.1.1 Ispitni i pomoćni zupčani prijenosnici

Da si se zadržala osnovna funkcija uređaja prema shemi na Slici 4.3, potrebno je upariti dva kućišta reduktora s istim razmakom osi vratila, a zupčanici (Z_1) i (Z_3) moraju imati isti broj zuba, što također vrijedi i za zupčanicke (Z_2) i (Z_4). Izvedba statičkog kućišta (K_2) prema Slici 4.3 izvedena je u zavarenoj izvedbi s osnim razmakom $a = 100$ mm. Kućište (K_2) zajedno s uparenim zupčanicima (Z_3) i (Z_4), čini pomoćni prijenosnik. Izbor parametara proračuna zupčanika proveden je prema sljedećim kriterijima:

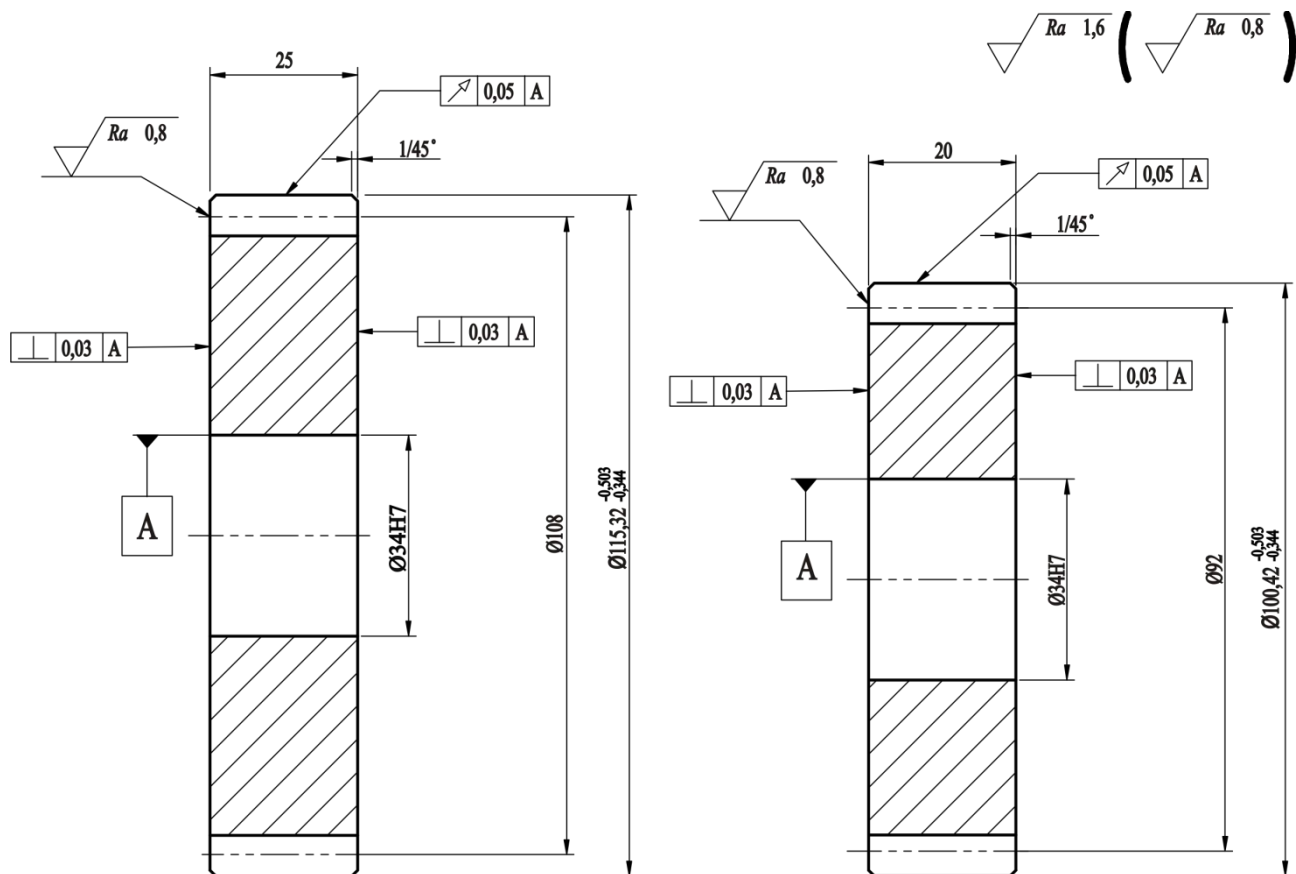
- zadani osni razmak $a = 100$ mm;
- prijenosi odnos što bliže 1, ostvareni ($i = 1,174$);
- neparan broj zubi barem na jednom zupčanicu;
- izbor pomaka profila prema DIN 3992, raspodjela prema visokom stupanju sprezanja;
- ujednačene brzine klizanja;
- proračun je proveden prema ISO 6336 [4] za ispitno opterećenje $t_i = 50$ nm, i brzini vrtnje $n = 3000 \text{ min}^{-1}$.

Za pomoćne zupčanicke odabrani su cilindrični zupčanici s evolventnim ozubljenjem i ravnim zubima. Podaci o zupčanim parovima nalaze se u Tablici 4.1 dok su radionički crteži pomoćnih zupčanika dani na Slici 4.5. Na Slici 4.6 prikazani su zupčanici u montaži. U svrhu maksimalnog smanjivanja radijalnog odstupanja u sklopu, odnosno smanjivanja utjecaja pomoćnog zupčanog para na ispitni zupčani par, povezivanje vratila i zupčanika (Z_3) i (Z_4) izvedeno je preko centrirajuće stezne čahure SIT-LOCK 3 dimenzija $\varnothing 25 \times 34$ mm i maksimalnog prijenosnog momenta $T = 286$ Nm. Za osnovni profil oba zupčanika odabran je profil prema DIN 3972 II [75] s polumjerom zaobljenja podnožja ozubnice $\rho_{fp} = 0,20 \cdot m$. Bokovi oba zupčanika brušeni su prema sistemu *Reichshauer* sa svrhom postizanja više kvalitete površinske obrade te smanjenja pogrešaka nastalih

obradom. Materijal oba zupčanika je 34CrNiMo6, a zupčanici nisu toplinski obrađeni. Podmazivanje pomoćnog prijenosnika provedeno je s pomoću ulja INA Epol Sp 150, proizvođača INA, bućkanjem.

Tablica 4.1 Podaci o zupčanom paru pomoćnog prijenosnika (duljine u mm)

Parametar	Oznaka	Pogonski zupčanik	Gonjeni zupčanik
Broj zubi	z	23	27
Modul	m	4	4
Kut profila	α_n	20	20
Osnovni profil ozubljenja		DIN 3972 II	DIN 3972 II
Polumjer zaobljenja podnožja ozubnice	ρ_{fp}	0,20m	0,20m
Kut nagiba boka	β	0	0
Diobeni promjer	d	92	108
Promjer temeljne kružnice	d_b	86,452	101,487
Faktor pomaka profila	x	+0,050	-0,080
Visina zuba	h_t	9,00	9,00
Promjer podnožne kružnice	d_f	82,419	97,360
Promjer tjemene kružnice	d_a	100,399	115,359
Pogonski kut zahvata	α_w	19,794	19,794
Promjer kinematske kružnice	d_w	91,899	107,870
Kvaliteta/područje tolerancija prema DIN 3967	-	6 b26	6 b26
Debljina zuba na diobenoj kružnici	s	6,429	6,050
Mjerni broj zubi	z_w	3	3
Mjera preko zubi	W_{kmax}	30,182	30,802
	W_{kmin}	30,013	30,802
Promjer valjka/kuglice	d_r	7	7
Mjera preko valjaka/kuglica	M_{dmax}	100,085	117,160
	M_{dmin}	99,630	117,160
Tolerancija razmaka osi	-	Js7 (As=±0.02)	
Razmak osi	a	100.00	



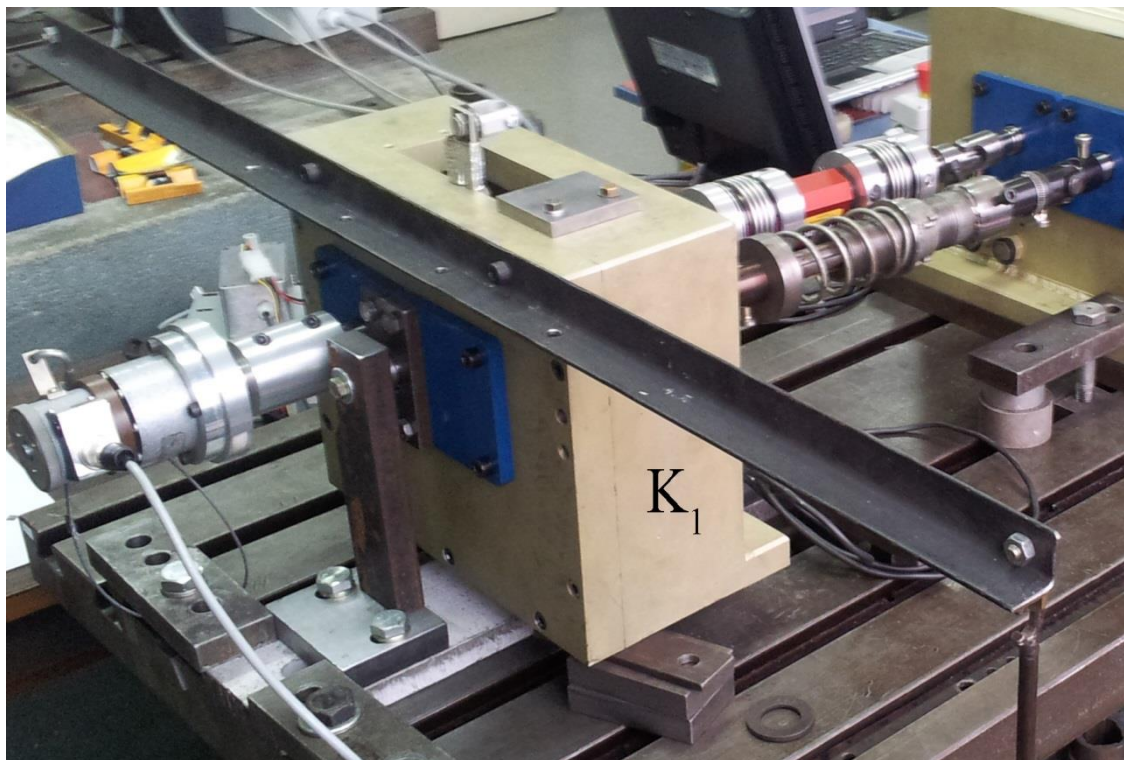
Slika 4.5 Crteži pomoćnih zupčanika izrađenih od čelika 34CrNiMo6



Slika 4.6 Pomoćni prijenosnik, montaža zupčanika

Ispitno kućište (K_1) (Slika 4.3 i 4.7), izvedeno je kao viseće s dva oslonca, smještena u ravnini s ulaznim vratilima na udaljenosti 50 mm od odredišta zupčanika (Z_1). Zakretanjem kućišta (K_1) dolazi do rotacije zupčanika (Z_1) i (Z_2) oko ležišta i unosa ispitnog momenta. Na ispitnom prijenosniku provodi se mjerenje temperature preko bezkontaktnog senzora temperature (*Optris CT*

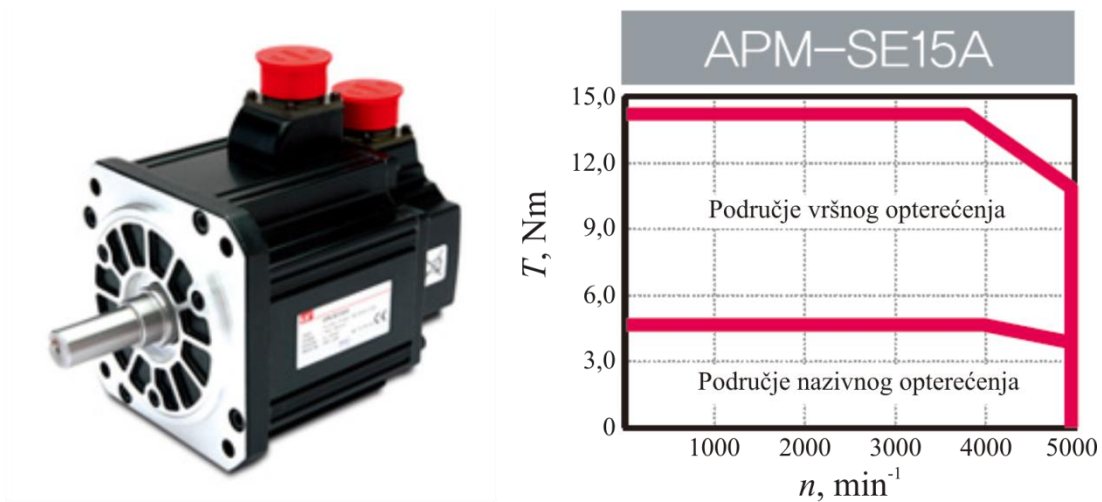
P7, poglavlje 4.2), te mjerenje temperature kućišta kontaktnim mjerenjem s pomoću senzora temperature tip *Pt100*. Na izlaznom vratilu zupčanika (Z_2) nalazi se osjetilo torzijskih vibracija, tip *BD5* proizvođača *Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM)*, kojim se mjeri razlika vibracija tijekom radnog vijeka zupčanika. Ispitno kućište (K_1) izvedeno je kao zavareno te su zupčanici (Z_1) i (Z_2) spojeni na vratilo (V_1) i (V_2) preko utora za pero, sukladno normi ISO 773, u svrhu brže montaže i demontaže tijekom provedbe ispitivanja.



Slika 4.7 Ispitni prijenosnik

4.1.2 Pogon ispitnog postolja

Za pogon radnog stroja odabran je sinkroni servomotor (Slika 4.8) s permanentnim magnetima (SMPM), identičnih pogonskih karakteristika (tip *APMSE15A*) proizvođača *Mecapion Ltd* (Južna Koreja). Osnovne tehničke karakteristike pogonskog motora prikazane su u Tablici 4.2. Odabrani servomotor opremljen je inkrementalnim enkoderima koji generiraju diferencijalne TTL signale za povratnu vezu brzine i pozicije (A, B + indeks), te emulirane signale Hallovih osjetila, primijenjene za elektroničku komutaciju u sklopu servoregulatora.



Slika 4.8 Sinkroni servomotor APM-SE15A i pripadajuća karakteristika

Primjenom sinkronih motora te finim namještanjem sustava, moguće je dobiti vrlo preciznu regulaciju brzine, čime se utječe na povećanje točnosti prilikom mjerenja torzijskih vibracija sustava, odnosno smanjuje se poremećaj prouzročen promjenama brzine vrtnje. Optimiranje pogona sustava temelji se na povratnoj vezi brzine. Poznavanjem iskoristivosti prijenosnika, te modifikacijom izraza 4.3, moguće je izračunati očekivani potreban moment za pogon ispitnog postolja odnosno očekivani nazivni moment izabranog radnog stroja.

Tablica 4.2 Osnovni tehnički podaci odabranog pogonskog motora

	Vrijednost	Jedinica
Nazivna snaga	1500	W
Nazivni moment	4,77	Nm
Maksimalni moment	14,32	Nm
Moment inercije	11,999	$\text{kgm}^2 \cdot 10^4$
Nazivna brzina vrtnje	3000	min^{-1}
Nazivna jakost struje	8,23	A_{RMS}
Maksimalna učestalost vrtnje	5000	min^{-1}
Rezolucija enkodera	3000	impulsa/okretaju
Konstanta momenta vrtnje motora (K_T)	0,594	Nm/A_{RMS}
Naponska konstanta vrtnje motora (K_V)	38,6	$V_{\text{RMS}}/(\text{min}^{-1} \cdot 10^3)$

4.1.2.1 Napajanje sustava

Napajanje energetskog dijela servoregulatora izvedeno je zasebnim odvojenim transformatorom, dok je napajanje mjernog sustava i sustava za prikupljanje podataka provedeno izravno preko gradske mreže. Odvajanjem izvora napajanja pojedinih cjelina sustava, u velikoj se mjeri smanjuje njihov međusobni utjecaj na stvaranje šuma, često prisutnog u industrijskim uvjetima kod sličnih sustava.

4.1.2.2 Regulator pogonskog motora

Regulacija po brzini izvedena je digitalnim servoregulatorom tvrtke *Advanced Motion Controls* [76], *Inc.* (AMC) (Slika 4.9), predviđenog za upravljanje sinkronim motorima s permanentnim magnetom (SMPM). Izvedba tih regulatora zasnovana je na principu vektorske modulacije, a ovisno o aplikaciji moguća je njihova primjena i za regulaciju pozicije.

Parametri regulatora, odnosno parametri vezani uz parametre strujne petlje, namješteni su prema preporuci proizvođača i karakteristikama odabranog motora, dok su parametri brzinske petlje i pojačanja namješteni ručno, prema karakteristikama radnog stroja, primjenom *DriveWare* softverskog paketa. Iscrpnji tehnički podaci za ugrađeni regulator dostupni su u [76], dok su u Tablici 4.3 prikazane samo tehničke karakteristike ulazno-izlaznog sučelja servo regulatora. Parametriranje regulatora izvodi se pomoću serijske (RS-232) veze, primjenom *DriveWare* softverskog paketa.



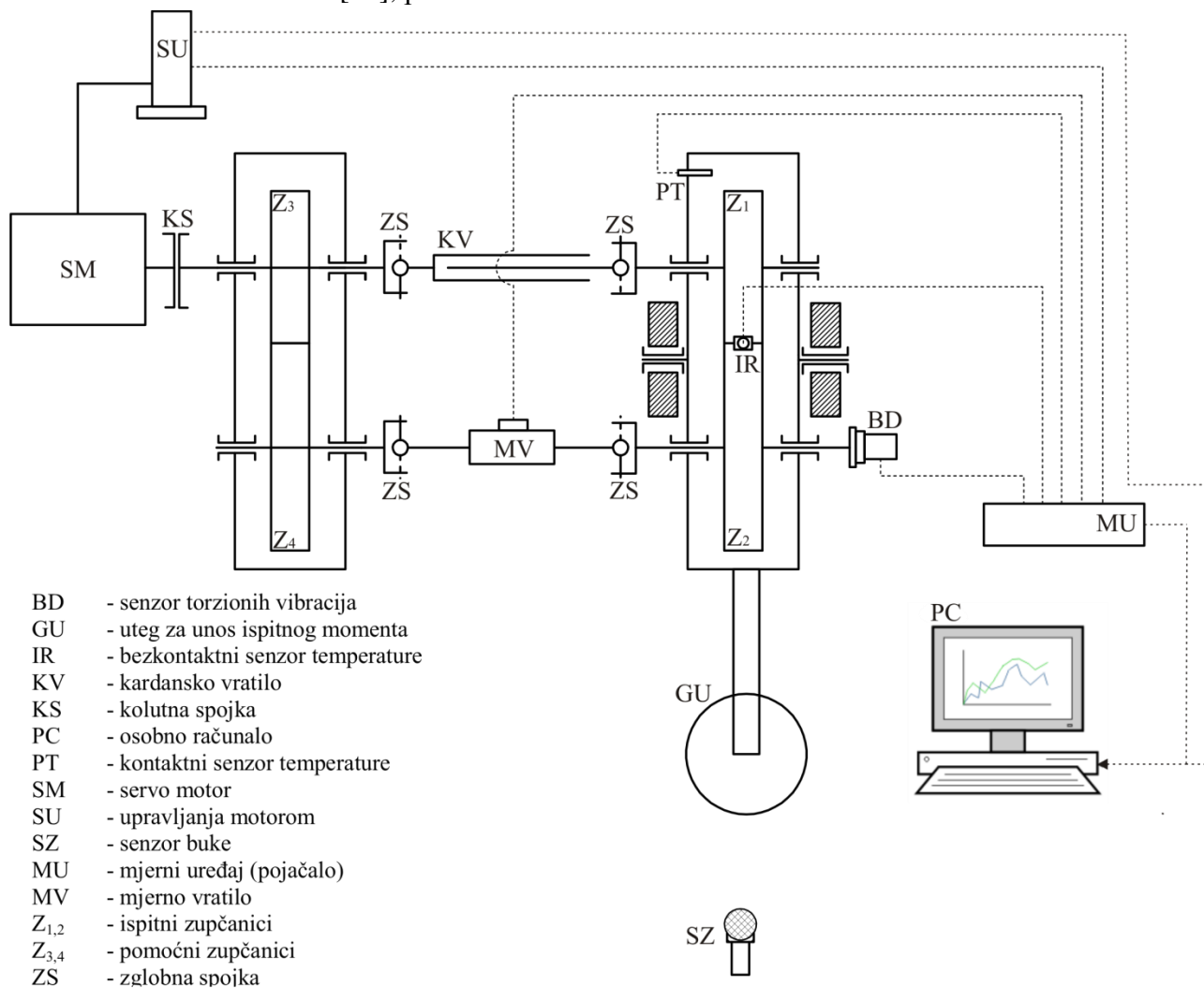
Slika 4.9 Servo regulator DPRAHIE-030A400

Tablica 4.3 Tehničke karakteristike ulazno - izlaznog sučelja servo regulatora

	Vrsta I/O	Područje	Broj	Opis / Namjena
Ulazi	Analogni	$\pm 10V$ (16/12-bitna rezolucija)	4	<ul style="list-style-type: none"> Opća (programabilno) Referenca momenta i brzine vrtnje
	Digitalni	24V DC	7	<ul style="list-style-type: none"> Opća (programabilno): <ul style="list-style-type: none"> Opća dozvola gibanja Zabrana gibanja naprijed/nazad Stop u nuždi
	Brzi digitalni	Diferencijalni TTL signal	3	<ul style="list-style-type: none"> Referenca brzine (PWM + smjer) Referenca pozicije (<i>e. encoder following</i>)
	Enkoderski	Diferencijalni kvadraturni TTL signal (A, B i indeksni)	1+1	<ul style="list-style-type: none"> Povratna veza prema brzini i položaju Referenca položaja preko navedenih brzih digitalnih ulaza
Izlazi	Enkoderski		1	<ul style="list-style-type: none"> Izdavanje povratne veze po brzini i položaju nadređenom regulatoru
	Digitalni	24V DC	4	<ul style="list-style-type: none"> Opća (programabilno) <ul style="list-style-type: none"> Regulator aktivan Dojava pogreške u regulatoru
	Analogni	$\pm 10V$ (10-bitna rezolucija)	1	<ul style="list-style-type: none"> Izdavanje signala koji u skaliranom odnosu odgovara nekoj određenoj veličini u procesu regulacije (npr. jakost struje regulatora i sl.)

4.2 Mjerni sustav

Mjerni sustav tako je izveden da postoji mogućnost ispitivanja samo zupčanika bez maziva. Na Slici 4.10 prikazana je struktura mjernog sustava te načini spajanja i prikupljanja podataka, dok je u Tablici 4.4 prikazan popis svih mjernih sustava i način prikupljanja signala. Tijekom provedbe eksperimenta, prikupljanje podataka provodi se s pomoću mjernog pojačala tip *Spider 8* (Slika 4.10) proizvođača *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM)* (Njemačka) [77] i programskog paketa *Catman* [78], dok se upravljanje smjernom i brzinom provodi s pomoću softvera za upravljanje servomotorima *DriveWare* [79], proizvođača *Advanced Motion Controls*.



Slika 4.10 Struktura mjernog sustava

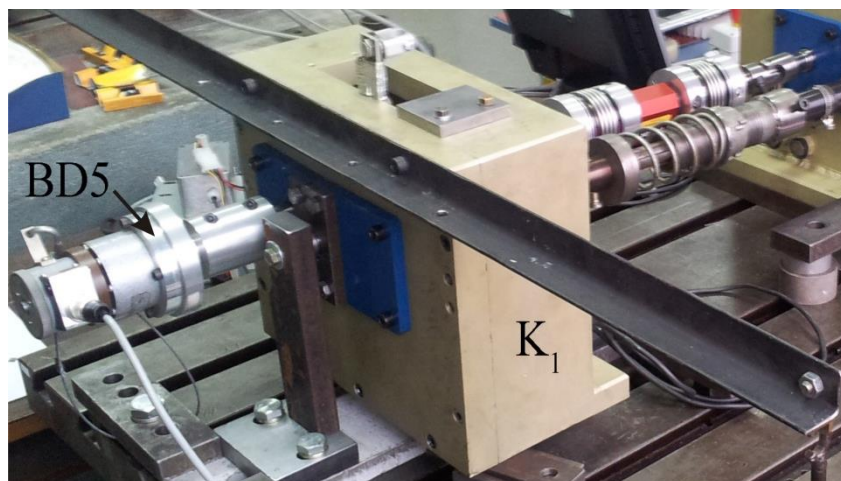
Tablica 4.4 Popis veličina i mjernih sustava kod provođenja eksperimenta

Mjerena veličina	Mjerni sustav	Prikupljanje signala	
		Upravljačkim sustavom stroja	Vanjskim mjernim računalom
Ispitni moment zupčanika, T_i [Nm]	Mjerno vratilo, TRS 600, mjerno područje 50 Nm		✓
Jakost struje motora, moment otpora, T_v [Nm]	Servo-regulator	✓	
Brzina vrtnje	Mjerno vratilo, TRS 600, brzina maksimalno 9000 min^{-1}		✓
Torzion vibracije	Senzor torzijskih vibracija, HBM, BD5		✓
Temperatura kućišta	Termopar (Pt100)		✓
Temperatura okoliša			✓
Temperatura boka zuba	IR, bezkontaktni termometar OPTRIS CT P7		✓
Buka [dB]	Ručni mjerač Delta OHM, HD 8701		✓

Ispitni moment unesen u mjerni krug (T_i) mjeri se pomoću bezkontaktnog mjernog vratila serije *TRS 600* (tip *FSH01999*), proizvođača *FUTEK Advanced Sensor Technology* (Kalifornija, USA) [80], mjernog područja do 50 Nm. Opisano mjerno vratilo, osim ispitnog momenta, daje i podatak o brzini vrtnje do 9000 min^{-1} , napajanje mosta 11 do 26 VDC, izlazni mjerni napon ± 5 VDC.

Jakost struje motora, proporcionalna je momentu otpora (T_v) u sustavu prema istraživanjima [81, 82], te se mjeri analogni izlazni signal napona ± 10 V iz servo regulatora koji se preko pojačala snima u mjerno računalo, gdje je moguće provesti kalibraciju prema odnosu jakosti struja i nominalnog momenta servomotora. Opravdanost primjene takvog načina mjerenja, prikazana je radom [83].

Snimanjem signala osjetilom torzijskih vibracija BD proizvođača *Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM)*, mjeri se relativna promjena vibracija koja se javlja tijekom radnog vijeka polimernog zupčanika, odnosno koja se prenosi kroz cijeli sustav. Nepravilnosti tijekom izrade zupčanika, pogreška koraka, istrošenost bokova, loma zuba, stupanj prekrivanja, elastičnosti vratila samo su neki od uzroka koju izazivaju torzijske vibracije u sustavu. Snimanjem relativne promjene torzijskih vibracija tijekom radnog vijeka polimernih zupčanika te obradom signala, dobiva se uvid o utjecaju radnih parametara na kvalitetu prijenosa, odnosno mirnoću rada. Mjerni uređaj za snimanje torzijskih vibracija nije umjeravan već su za tu svrhu upotrijebljeni tvornički kalibracijski parametri uređaja. Senzor torzijskih vibracija ugrađen je na ispitni prijenosnik preko krute spojke na izlazno vratilo zupčanika (Z_2), prema Slici 4.11. Osnovne karakteristike senzora torzijskih vibracija BD5 dane su u [84].



Slika 4.11 Mjerač torzijskih vibracija BD 5

Mjerenje temperature boka zuba važan je parametar u određivanju granica opteretivosti za polimerne zupčanike te postoji značajan utjecaj temperature i na ostale mjerljive parametre koji definiraju kvalitetu rada zupčanika. Određivanje srednje temperature boka na izlazu iz zahvata provodi se primjenom usmjerenog bezkontaktnog termometra za plastične materijale oznake, *CT P7* proizvođača *Optris GmbH* (Njemačka), mjernog područja od 0 °C do 710 °C, razlučivosti 0,5 °C, točnosti $\pm 1\%$ ili 1,5 °C u statičkim uvjetima, ponovljivosti $\pm 0,5\%$ pri sobnoj temperaturi od 23 °C. Vrtnjom zupčanika dobiva se srednja temperatura boka koja ovisi o brzini vrtnje ispitnog zupčanika i učestalosti mjerenja (150 ms). Bezkontaktni termometar (Slika 4.12), sastoji se od senzora koji se pričvršćuje na kućište ispitnog prijenosnika preko nosača (Slika 4.13). Senzor je usmjeren u središte pogonskog zupčanika (Z_1) tako da žarište mjerne zrake pada na bok zupčanika (Z_1) koji izlazi iz zahvata. Potrebno je obratiti pozornost na smjer vrtnje pogonskog stroja. Smjer vrtnje mjerenog zupčanika mora biti takav da izlaz boka iz zahvata bude usmjeren na termometar. Veza između senzora te odvojene upravljačke elektronike ostvarena je pomoću vodiča dužine 3 m, dok je napajanje elektronike izvedeno kao zasebno, u rasponu od 8 do 34 VDC. Ispitni senzor povezan je s mjernim pojačalom, putem serijske (RS-232) veze. Programibilna upravljačka kutija omogućava podešavanje faktora emisivnosti te je provedeno umjeravanje uređaja prema ispitnom polimeru (PA 6) u *Laboratoriju za procesna mjerenja FSB-a*. Uređaj podržava dva izlazna analogna signala 0/4-20 mA preko relejnih prekidača, koja u slučaju visokih temperatura iznad temperature taljenja poliamida, dovode do gašenja sustava preko zaštitne sklopke. Iscrpan opis uporabljenog termometra dan je u [85].



Slika 4.12 Bez kontaktni termometar CT P7 (Optris)



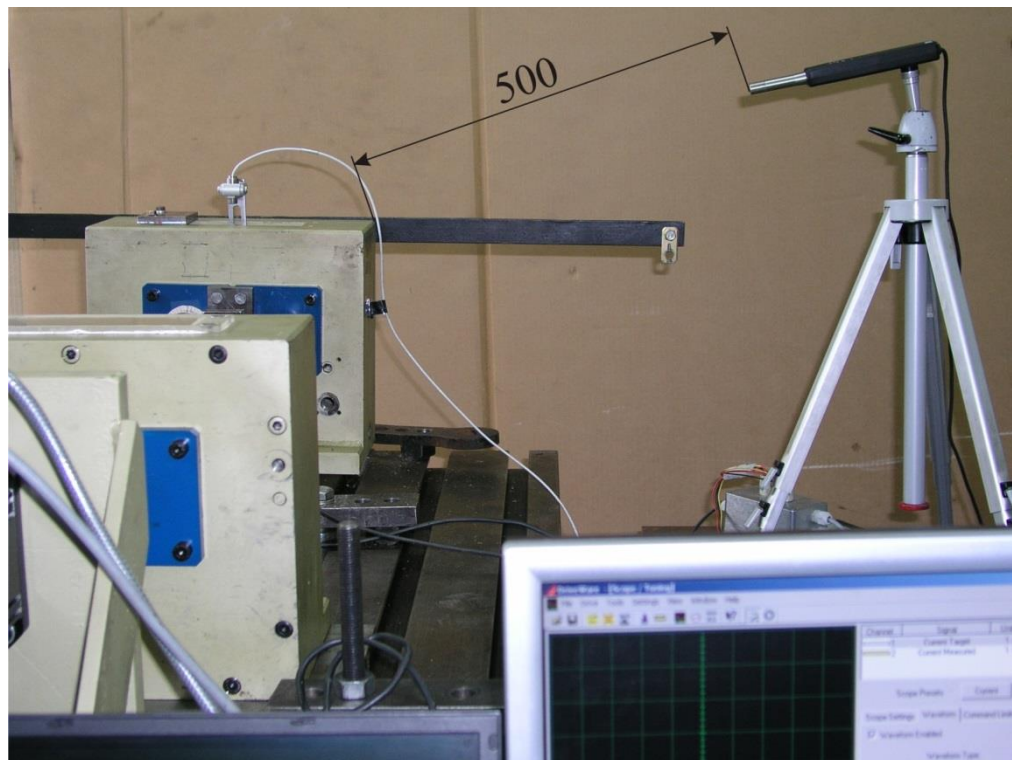
Slika 4.13 Smještaj termometra CT P7

U sklopu mjernog uređaja predviđeno je mjerenje temperature kućišta jednim kanalom pri čemu je upotrijebljen termopar tip Pt100, te mjerenja temperature i radnog okoliša stroja kroz jedan kanal s pomoću termopara tip Pt100, radnog područja od 0 do 600 °C. Umjeravanjem je postignuta točnost od $\pm 1,5$ °C. Mjerenje okolišne temperature provodi se isključivo kao kontrolna veličina za slučaj mogućih devijacija temperature okoliša te utjecaj temperature okoliša na izlazne rezultate ostalih mjernih veličina, odnosno uklanjanje grube pogreške. Smještaj senzora temperature za mjerenje radne okoline postavljen je na udaljenosti 1 m od najtoplijeg dijela ispitnog postolja zbog utjecaja topline nastale isijavanjem u okolinu. Mjerenje temperature kućišta provodi se na samom kućištu, pri dnu kućišta, a prijelaz topline osiguran je uporabom termo vodljive paste, da bi se osigurao što bolji prijelaz topline. Izgled senzora prikazan je na Slici 4.14.



Slika 4.14 Izvedba senzora za mjerenje temperature okoliša i temperature kućišta

Osim prikazanih automatiziranih mjernih sustava, provodi se i periodičko prikupljanje podataka o buci s pomoću ručnog mjerača buke, tip *HD 8701* proizvođača *Delta OHM* (Italija). Mjerno područje uređaja je od 30 dB(A) do 130 dB(A), rezolucije rezultata od 0,1 dB, klase preciznosti 2. Mjerenje buke provodi se prema A tipu za male zvučne intenzitete prema AGMA 299.01 normi [86]. Smještaj senzora nalazi se na udaljenosti od 0,5 m od izvora buke usporedno s kontrolnim otvorom, prema Slici 4.15, sukladno normi AGMA 297.02 [87], koja dopušta manje udaljenosti senzora od 1 m od izvora buke za potrebe usporedbe rezultata koji se provode na istom ispitnom kućištu. Ostali tehnički podaci o senzoru buke dani su u [88].



Slika 4.15 Položaj senzora HD 8701

Mjerenje i analiza rezultata

U ovom poglavlju iscrpno je opisan eksperimentalni dio rada te postupak mjerenja. Na osnovi dobivenih rezultata izvršena je analiza utjecajnih parametara na izlazne parametre. Poglavlje je podijeljeno u tri osnovne cjeline. U prvom dijelu opisan je koncept eksperimenta te plan provedbe i postupci mjerenja. Pojašnjeni su načini određivanja područja varijacija plana pokusa.

U drugoj cjelini ovog poglavlja provedena je iscrpna analiza parametara pokusa definiranjem ispitnih tijela, postavljanje kriterija radnog vijeka s osvrtom na ograničenja, proizišla iz plana pokusa, važna za određivanje ciklusa rada.

U trećoj cjelini težište je stavljeno na obradu rezultata eksperimentalnog istraživanja, dan je prikaz obrade podataka i rasprava rezultata dobivenih analizom podataka. Također su dane usporedbe pojedinih izlaznih veličina te su postavljene granice opteretivosti za ispitnu brzinu vrtnje prema ulaznim parametrima pokusa, uz analiziranje pojedinih faktora i njihova utjecaja na očekivani radni vijek polimernih zupčanika. Dane su proširene granice opteretivosti s obzirom na brzinu vrtnje, dobivene dodatnim istraživanjem, uzimajući u obzir utjecaj parametara iz prethodnih ispitivanja.

5.1 Koncipiranje eksperimenta

Glavna svrha rada je dati smjernice kako geometrijske karakteristike zupčanika u kombinaciji s radnim uvjetima utječu na rad zupčanika, izrađenih od poliamida (PA 6), te kakve to posljedice ima na ostvareni radni vijek. Zbog velikog broja mogućih utjecajnih geometrijskih faktora te provedenim istraživanjima (poglavlje 1.2), utvrđeni su parametri prema radnim uvjetima koji se u praksi često javljaju. Zasebno utjecaj svakog od odabranih parametara potvrđen je brojnim istraživanjima na području metalnih i polimernih zupčanika. Zupčanci u eksploataciji uvijek su opterećeni kombinacijom radnih uvjeta te se nameće i važnost poznavanja očekivanih vrijednosti granica opteretivosti u takvim uvjetima. Granice koje su postavljene za izbor parametara ispitivanja odnose se, ponajprije na ograničenja proizašla iz ispitnog postolja (poglavlje 4) s obzirom na tendenciju porasta uporabe polimernih zupčanika u prijenosima snage.

Budući da ispitno postolje ima fiksni osni razmak $a = 100$ mm a i zbog konstrukcijskih razloga usvojen je uvjet izbora barem jednog ispitnog zupčanik u paru s neparnim brojem zubi. U svrhu što veće usporedivosti rezultata s ispitivanjima kod metalnih zupčanika, cilj je što više približiti se standardnom testu za ispitivanje maziva za zupčanike (FZG ispitni uređaj). Utjecajni faktor opterećenja jedan je od glavnih uzročnika prestanka rada kako metalnih tako i polimernih zupčanika. Budući da granice opteretivosti zupčanika izravno ovise o narinutom opterećenju, time se nameće, x_1 - *ispitno opterećenje* kao prvi utjecajni faktor.

Podložnost polimernih materijala atmosferskim utjecajima mnogo je veća od metala. Polimerni materijali imaju visoku ovisnost mehaničkih svojstava o temperaturi (poglavlje 2.2.3). Poliamidi se kao materijali, zbog svojih mehaničkih svojstava i cijene materijala, pokazuju kao dobar izbor za prijenosnike srednjih do manjih snaga. Uz atmosferske uvjete, osim temperature, vrlo se često vezuje i postotak vlage u zraku. Polimerni materijali pogodni za izradu zupčanika više

su ili manje podložni apsorpciji molekula vode u svoju strukturu (poglavlje 2.2.1). Apsorbirane molekule vode mijenjaju mehanička svojstva polimera i dimenzije zupčanika. Polimerni zupčanici u područji ma povišene vlage često zamjenjuju metalne zupčanike ako to dopušta opterećenje. Nastojanjem proširivanja primjene polimernih zupčanika na prijenosnike snage uz poznati utjecaj temperature, nameće se pitanje kakav utjecaj apsorbirana voda u zupčanicama, tijekom rada, ima na radni vijek. Time je određen drugi utjecajni faktor, x_2 - *apsorpcija vode u materijalu*.

Tijekom zahvata zupčanika u radu, zbog razlika brzina klizanja nastalih klizanjem i valjanjem bokova zuba jedno preko drugog, dolazi do nejednolikog trošenja zupčanika. Projektiranje zupčanika obično se provodi prema optimalnim brzinama klizanja, te brzinama klizanja prema pogonskom, odnosno gonjenom zupčanicu. Zavisno od izbora pomaka profila, moguće je utjecati na brzine klizanja prilikom projektiranja polimernih zupčanika. Osim brzina klizanja, korekcija pomaka profila provode se i korekcije profila prema standardnom osnom razmaku, itd. Polimerni zupčanici zbog svoje male tvrdoće osjetljivi su na trošenje i povišenje temperature nastalo klizanjem bokova zuba, te se pomakom profila nastoji utjecati na povećanje radnog vijeka zupčanika. Pomacima profila, odnosno optimiranjem brzina klizanja prema primjeni polimernih zupčanika, pretpostavka je da je moguće utjecati na intenzitet trošenja i opteretivost zupčanika, čime je određen i treći utjecajni faktor, x_3 - *pomak profila*.

Definiranjem utjecajnih faktora moguće je napraviti plan pokusa, ali ostaje problematika određivanja područja ispitnih parametara. Provođenjem predpokusa, određuje se područje granica utjecajnih faktora.

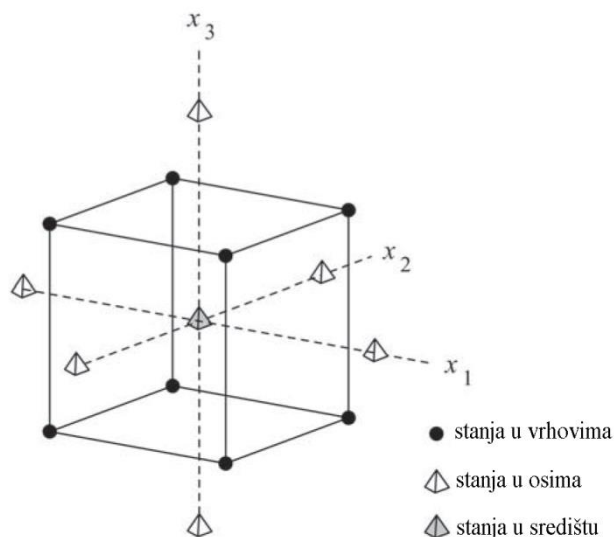
5.2 Planiranje pokusa

Koncipiranjem eksperimenta te određivanjem mogućih utjecajnih faktora izbor vrste pokusa temelji se prema tehničkim ograničenjima u svrhu određivanja granica opteretivosti. Glavnina ograničenja koja su utjecala na izbor vrste pokusa su:

- ograničenja ispitnog postolja;
- istraženost utjecajnih faktora;
- izvedivost stanja radnih točaka pokusa, odnosno simulacija utjecajnih faktora;
- vremensko ograničenje provedbe pokusa;
- cijena izrade ispitnih tijela.

Na osnovi predstavljenih ograničenja te odabranih utjecajnih faktora, izabran je centralno kompozitni plan pokusa.

Centralno kompozitni pokus (e. *central composite design* - CCD) ubraja se u skupinu pokusa višeg reda, tzv. metode odzivne površine. Metoda odzivne površine obuhvaća skup statističkih i matematičkih metoda koje se primjenjuju za razvoj, poboljšanje i optimiranje procesa. Mjerljiva veličina kvalitete tvorevine ili procesa, naziva se odziv. Poznavanje odzivne površine s dovoljnom preciznošću, točnošću i pouzdanošću, dopušta predviđanje budućih rezultata u području područja analiziranih faktora, te daje uvid u čitav proces [89]. Centralno kompozitni plan pokusa je svojevrsna alternativa potpunom faktorskom pokusu (3^k) koji na osnovi modela I. reda (2^k) dodavanjem točaka (stanja pokusa) u središtu i na osima, omogućuje procjenu parametara modela II. reda. Pokus se sastoji od 2^k stanja pokusa u vrhovima, $2 \cdot k$ stanja u osima i k stanja u središtu (Slika 5.1) (k = broj promatranih faktora) pa za odabrana tri utjecajna faktora vrijedi $k = 3$ (faktori x_1 , x_2 i x_3) vrijedi $2^3 + 2 \cdot 3 + 3$ odnosno 17 stanja pokusa, dok bi za potpuni faktorski plan pokusa (3^k) bilo potrebno 27 stanja pokusa.



Slika 5.1 Centralno kompozitni plan pokusa za tri faktora

Ako se pokus barem djelomično ponavlja, moguće je procijeniti pogrešku pokusa iz varijabilnosti ponovljenih stanja. Kako se ta stanja izvode pod identičnim uvjetima, odnosno identičnim razinama faktora, tako je procjena pogreške pokusa iz tih podataka neovisna o tome je li model pokusa linearan ili nelinearan, te sadržava li interakcije višega reda. Središnja točka daje informaciju o nelinearnosti o odzivu dok aksijalne točke daju mogućnost procjene parametara drugog reda. Može se stoga zaključiti da broj središnjih točaka bitno utječe na distribuciju procijenjene varijance u eksperimentalnom području.

Zbog ograničavajućih razloga proizašlih iz načina određivanja stanja utjecajnih faktora ispitivanja provedena su prema plošno kompozitnom planu pokusa (CCF) koji je varijanta centralno kompozitnog plana pokusa, uz uvjet $\alpha = 1$. Plošno kompozitni plan pokusa ne koristi aksijalne točke koje su jednako udaljene od središta kao što su udaljene vršne točke od središta, već padaju na sredinu plohe za slučaj tri i više faktora. Takav plan nije rotabilan, te raspodjela procjene varijance nije ujednačena u svim točkama jednako udaljenima od središta. Zbog nemogućnosti zadovoljavanja uvjeta prema izrazu 5.1, prema [90], legitimna je uporaba plošno kompozitnog plana pokusa (CCF). Zbog ograničenja proizašlih iz utjecajnog faktora koji se odnosi na apsorpciju vlage u materijalu, nemoguće je simulirati stanje više od maksimalne zasićenosti materijala.

$$\text{Udaljenost vršne točke} = \pm \sqrt{k} \quad (5.1)$$

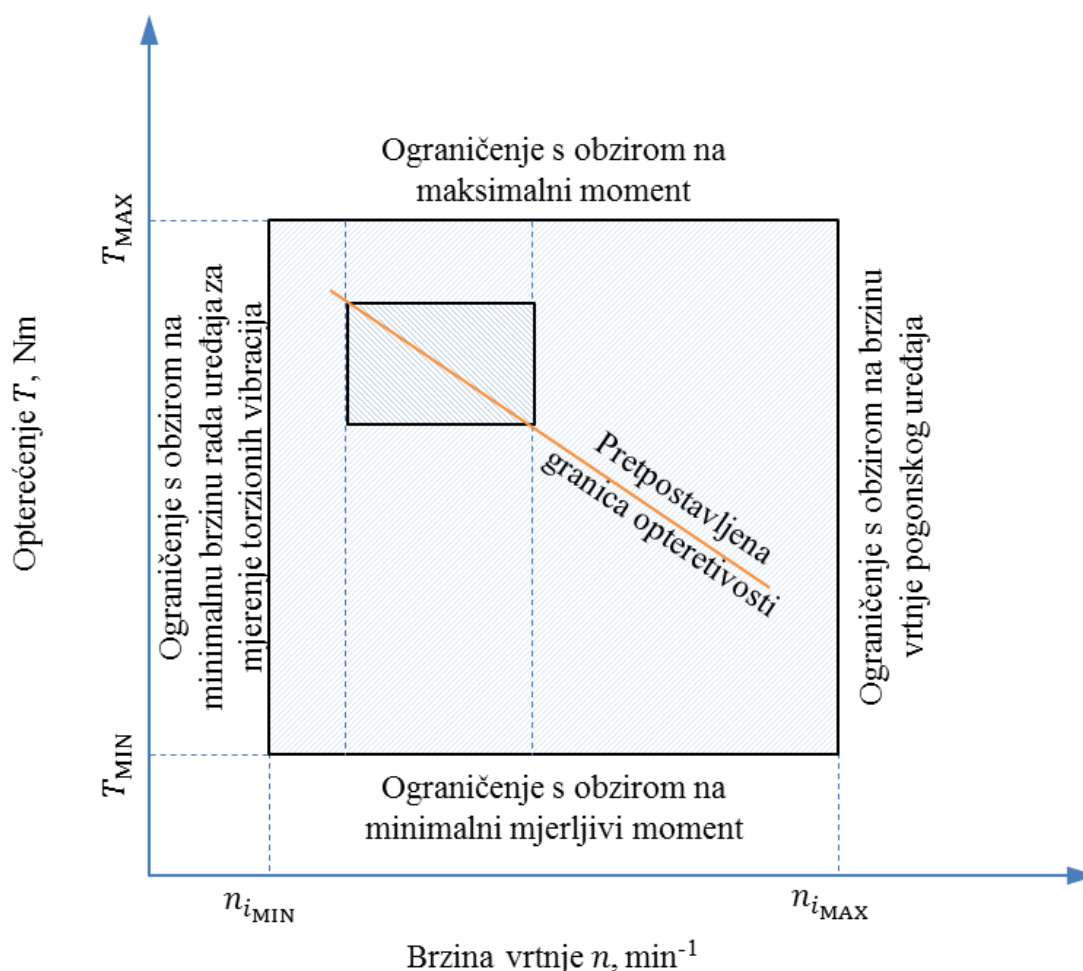
Odzivna površina određena je izrazom 5.2 (polinom II. stupnja) te vrijedi za općeniti slučaj.

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + \dots + b_k \cdot x_k + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + \dots + b_{k-1} \cdot x_{k-1} \cdot x_k + b_{11} \cdot x_{11}^2 + \dots + b_{kk} \cdot x_k^2 \quad (5.2)$$

Pri tome se koeficijenti b_0, \dots, b_k određuju s pomoću metode minimalnog zbroja kvadrata odstupanja računskih vrijednosti od stvarnih vrijednosti.

5.2.1 Određivanje područja varijacije

Osnovni kriteriji izbora područja ispitnih parametara čine ograničenja ispitnog postolja, geometrijska ograničenja i svojstva ispitnog materijala zupčanika. Za određivanje granica opteretivosti potrebno je okvirno definirati područje rasipanja utjecajnih faktora na radni vijek ispitnih zupčanika (Slika 5.2). Ispitna opterećenja ograničena su dimenzijama i mjernim uređajima ispitnog postolja, pri čemu su ograničene i maksimalne dimenzije zupčanika (poglavlje 4.1.1). Geometrijska ograničenja u funkciji opteretivosti odnose se na zadani osni razmak pomoćnog zupčanika te broj zuba zupčanika i prijenosi omjer. Maksimalni mogući ispitni moment $T = 50 \text{ Nm}$ odnosi se na mjerno područje ispitnog vratila unutra ispitnog kruga. Definiranjem osnovnih dimenzija ispitnih zupčanika prema zadanom materijalu (PA 6) i važećoj normi BS 6168, određena su maksimalna dopuštena opterećenja za pretpostavljenu temperaturu zupčanika. Ispitivanjem tri para ispitnih zupčanika određena je približno, granica opteretivosti zupčanika za brzinu vrtnje motora $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ i širinu od $b = 20 \text{ mm}$. Dok je donja granica opteretivosti za cijelo mjerno područje ispitnog postolja definirana mjernim vratilom, i iznosi $T = 5 \text{ Nm}$.

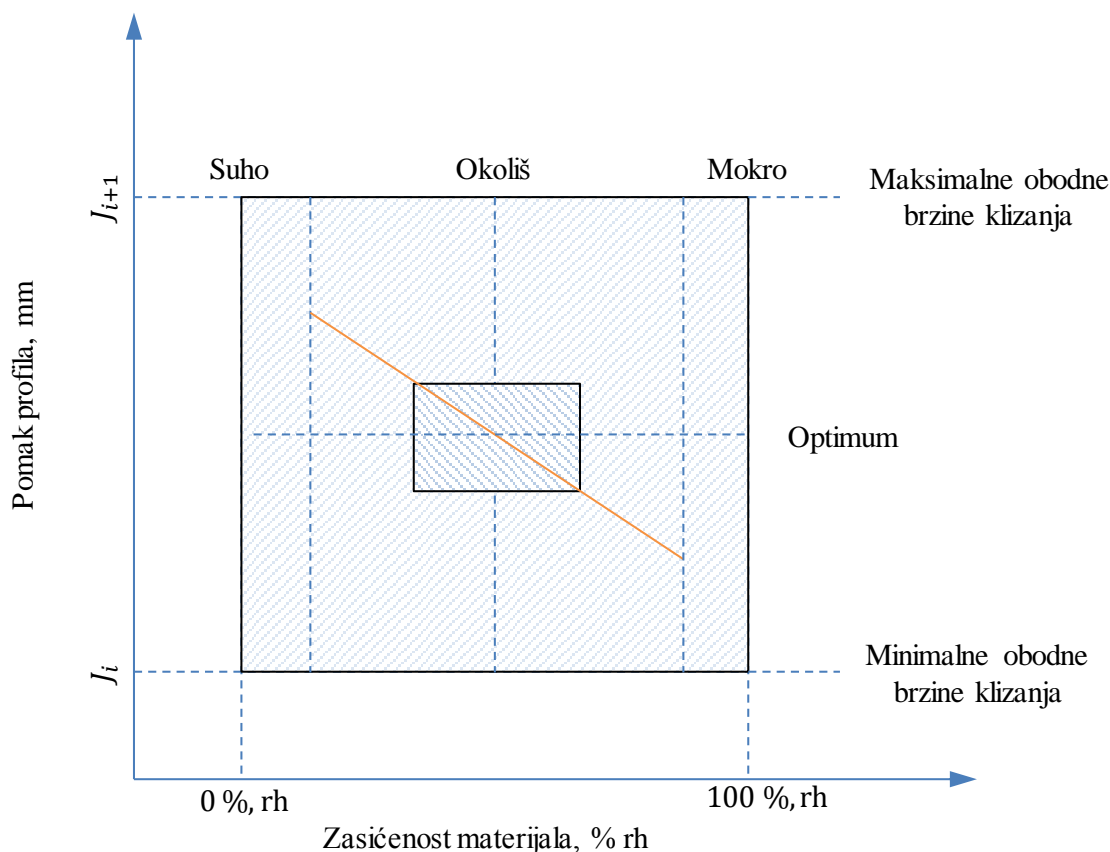


Slika 5.2 Izbor područja varijacija parametara

Izbor brzine vrtnje određen je prema učestalosti primjene te na osnovi ograničenja ispitne postavke. Brzine vrtnje pogonskog motora tijekom pretpokusa i glavnog pokusa držane su konstantnima u iznosu od $n = 1000 \text{ min}^{-1}$. Minimalna brzina vrtnje ograničena je mjernim područjem uređaja za detekciju torzijskih vibracija BD proizvođača *Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM)* i iznosi $n = 400 \text{ min}^{-1}$, pri čemu je gornja granica određena maksimalnom brzinom vrtnje pogonskog stroja

od $n = 3000 \text{ min}^{-1}$. Odabrani brzina vrtnje od $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ radnog stroja, odnosno $n_2 = 851,51 \text{ min}^{-1}$ za zupčanik (Z_2), (Slika 4.2) prema dobivenom prijenosnom omjeru $i = 1,173$, nalazi se u radnom području većine radnih strojeva za uporabu prijenosnika snage i gibanja.

Postavljanje granica apsorpcije vode u materijalu izvršeno je prema ekstremnim stanjima radne okoline (Slika 5.3), za slučaj vrlo visokog udjela vode u materijalu kod potpunog zasićenja. Takvo stanje materijala posljedica je dugog izlaganja poliamida (PA 6) atmosferi s visokim postotkom vlage u zraku ili uronjenosti u vodi. Slučaj minimalnog udjela vode u materijalu kao drugi ekstrem radne okoline, javlja se u slučajevima duljeg izlaganja poliamidnih zupčanika stanju snižene vlažnosti. Središnje stanje radne okoline u području oko 50% relativne vlažnosti u zraku i temperature od 23°C . mijenja se ovisno o radnoj okolini te se nalazi u granicama od $\pm 6\%$ ovisno od temperature okoline.



Slika 5.3 Izbor područja varijacija parametara x_2 i x_3

Određivanje pomaka profila izvršeno je za zadani osni razmak $a = 100 \text{ mm}$ i izabrani broj zubi prema kriterijima optimalnih brzina klizanja te za slučaj maksimalne podrezanosti manjeg, odnosno maksimalne dopuštene podrezanosti većeg zupčanika.

5.2.1.1 Određivanje apsorpcije vode u ispitnim zupčanicima

Normirana ispitivanja polimera na apsorpciju vode prema HRN ISO 62 [70] provode se u destiliranoj vodi do zasićenja ispitnih tijela maksimalne debljine $2,05 \pm 0,05$ mm. Zasićenje ispitnih zupčanika provedeno je u destiliranoj vodi, u trajanju 12 dana, pri temperaturi vode 70°C . Povećanjem temperature vode [34] ubrzava se pokretljivost molekula, a time i apsorpcija vode, i ne dolazi do promjena u strukturi prouzročenih previsokom temperaturom. Iznos ispitne temperature izabran je stoga da ne dolazi do naknadne kristalizacije te da se postigne što veća zasićenost. Za temperaturu od 70°C i vrijeme kondicioniranja od 12 dana, u destiliranoj vodi, prikazana je koncentracija zasićenja kroz promatranu debljinu ispitnog zupčanika (Slika 5.4) prema izrazu 5.3. Iz slike se može zaključiti da sredina zupčanika neće biti u maksimalnom zasićenju od 10% , već u zasićenju od 1.9%, dok prosječna koncentracija po debljini stijenke iznosi 4%. Dijagram prema Slici 5.4 vrijedi za idealne slučajeve kod ploče ili diska određene debljine, a polimerni zupčanci zbog svoje geometrije zuba imaju promjenu debljine zuba po visini zuba. U svrhu određivanja granica opteretivosti kod zupčanika na različitim stupnjevima zasićenja može se reći da je zasićenost materijala u području debljine zuba relevantna kod određivanja utjecaja na radni vijek. Na Slici 5.5 prikazan je raspored zasićenosti za debljinu stijenke od 8,25 mm kao maksimalne debljine stijenke na kojoj još postoji konstantna zasićenost po cijeloj debljini. Ispitni zupčanci imaju manju debljinu zuba u korijenu prema dimenzijama ispitnih tijela (poglavlje 0). Može se dakle zaključiti da ako je debljina korijena zuba manja od 8,25 mm prema uvjetima kondicioniranja smatra se da je materijal u području cijele debljine zuba zasićen do maksimalne koncentracije od 10% prema [34].

$$C_t = C_s \cdot \frac{2,256}{b} \cdot \sqrt{D \cdot t} \quad (5.3)$$

Pri čemu je:

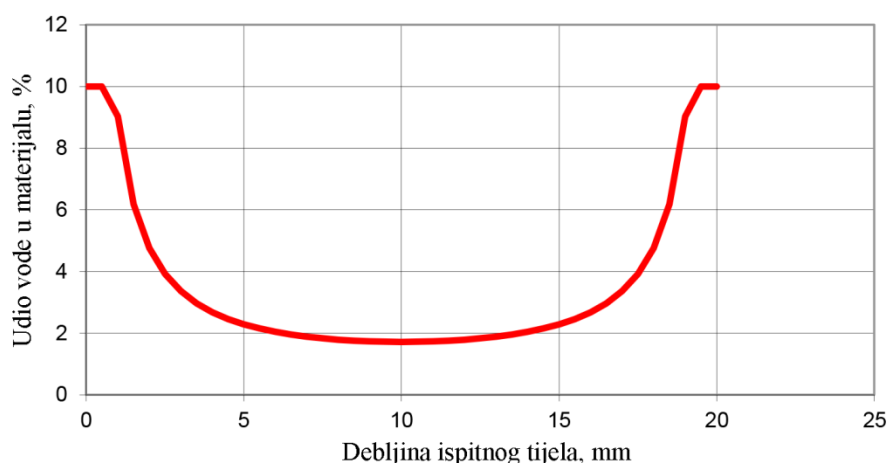
C_t - koncentracija vode u materijalu prema vremenu apsorpcije, %

C_s - koncentracija zasićenja, %

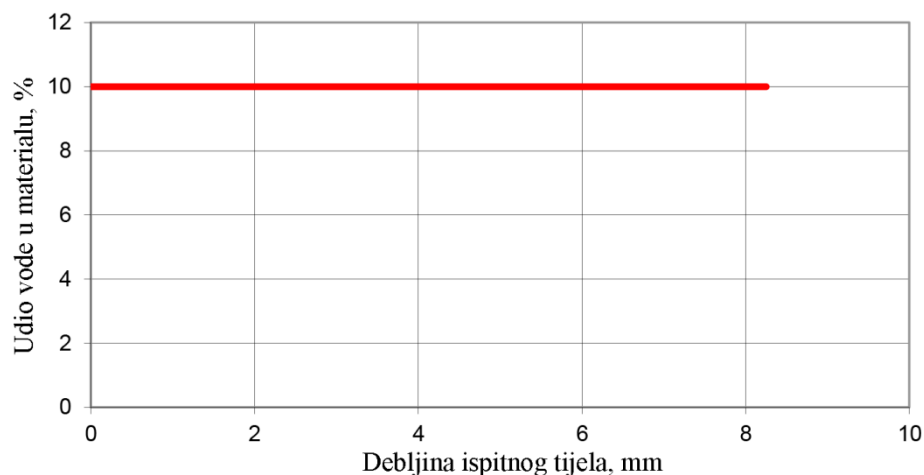
b - debljina ispitnog tijela, cm

t - vrijeme, s

D - difuzijski broj, cm^2/s



Slika 5.4 Koncentracija vode poliamida PA 6 prema debljini stijenke



Slika 5.5 Koncentracija vode u poliamida PA 6 za debljinu stijenke 8,25 mm

Mjerenjem promjena mase ispitnog zupčanika prije i nakon tretmana prema Tablici 5.1, izvršena je kontrola promjene mase za ispitna tijela tretirana vodom. Ispitna su tijela prije provedbe vaganja, sušena na temperaturi od 50 °C u trajanju od 24h, te hlađeni u eksikatoru do sobne temperature, da bi se izvršilo prvo mjerenje mase, te su nakon toga kondicionirana. Izmjereno povećanje mase prikazuje prema izrazu 5.4 udjel vode u ispitnom zupčaniku. Razlika vrijednosti dobivenih izrazom 5.3 nasuprot izmjerenih vrijednosti i prosječnog odstupanja daje 0,05 g veću vrijednost preko izraza 5.3, dok je razlika od 0,18 g dobivena kod ispitnih tijela debljine 20 mm. Za uzorak debljine 20 mm, vrijeme potpunog kondicioniranja po debljini materijala za poliamid (PA 6) prema izrazu 5.3, iznosi 70 dana na temperaturi vode od 70 °C.

$$c_v = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100 \% \quad (5.4)$$

Gdje je:

c_v - apsorpcija vode, %

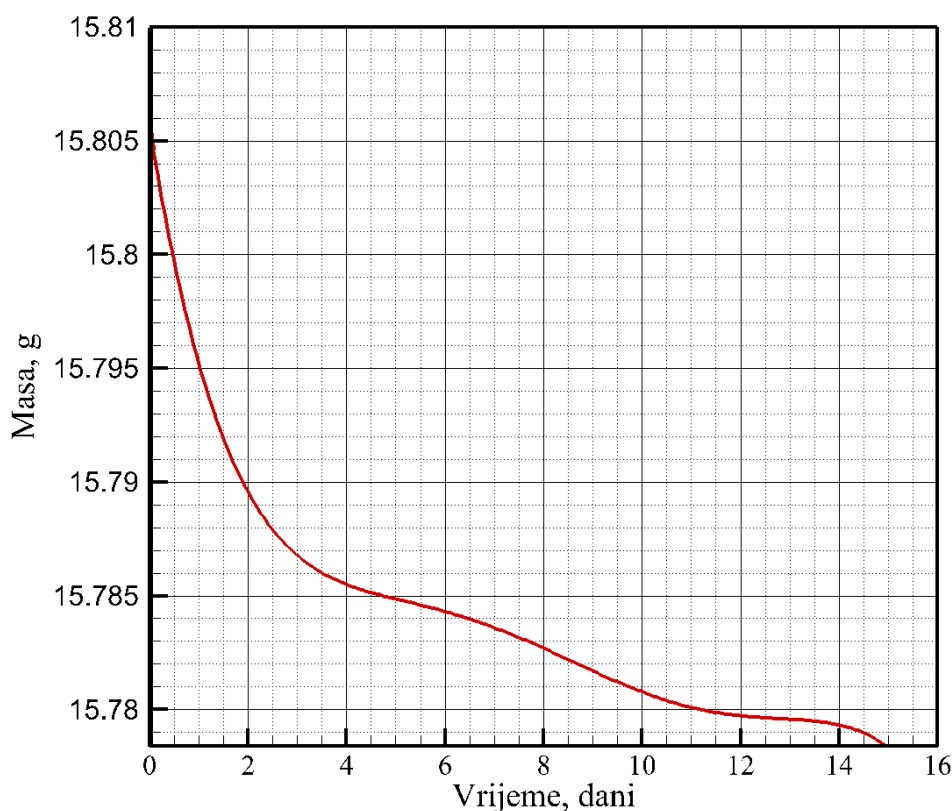
m_1 - masa prije kondicioniranja, g

m_2 - masa nakon kondicioniranja, g.

Tablica 5.1 Prikaz povećanja mase nakon kondicioniranja za ispitna tijela debljine 25 i 20 mm

Debljina zupčanika $b = 25$ mm				
Uzorak	Masa prije kondicioniranja, m_1 [g]	Masa nakon kondicioniranja, m_2 [g]	Povećanje mase zbog kondicioniranja, c_v [%]	Prosječno povećanje [%]
1003-1	220,8718	228,768	3,451	3,2697
3001-1	212,6514	219,217	2,996	
2001-1	234,461	241,867	3,062	
3002-1	213,044	220,905	3,558	
2002-1	234,1324	242,073	3,280	
Debljina zupčanika $b = 20$ mm				
1003-2	125,674	131,095	4,135	3,9599
3001-2	131,5194	136,308	3,512	
2001-2	116,7072	121,432	3,891	
3002-2	131,365	137,026	4,131	
2002-2	117,1728	122,219	4,129	

Smanjenjem vlage u materijalu dolazi do otpuštanja molekula vode iz materijala, odnosno dolazi do smanjenja mase. Takvo se stanje poliamida postiže sušenjem materijala pri povišenoj temperaturi uz cirkulaciju zraka. Često se polimerni materijali koji imaju tendenciju apsorpcije vode, poput poliamida prije injekcijskog prešanja suše u sušilicama. Tijekom zagrijavanja materijala kroz dulje vremensko razdoblje, ovisno o debljini materijala, dolazi do pada mase. U svrhu određivanja potrebnog vremena sušenja izvršen je pokus sušenja ispitnog tijela, debljine 20 mm, pri temperaturi od 70°C, s mjerenjem mase svakih 24 sata do postizanja konstantne mase. Prema Slici 5.6, dobiveno je da u razdoblju od 12 dana, pri temperaturi od 70°C dolazi do zasićenja mase u području razlučivosti mjerne vage. U Tablici 5.2 dani su podaci o smanjenju mase prije i nakon sušenja, pri temperaturi od 70°C nakon 12 dana kondicioniranja, te prosječno smanjenje vlage u materijalu. Tim načinom nije moguće potpuno izbaciti vlagu iz materijala, nego će doći do snižavanja. Nakon sušenja, ispitna su tijela ohlađena u eksikatoru te se pristupilo mjerenju gubitka mase. Mjerenje ispitnih zupčanika provedeno je pomoću vage točnosti 0,001 g tipa PRJ 1200-3N, proizvođača *Kern & Sohn GmbH* (Njemačka), (Slika 5.7), dok je određivanje mase ispitnih tijela za određivanja zasićenja mase provedeno na vagi proizvođača *Tehnica-Železniki* (Slovenija), točnosti 0,0001 g.



Slika 5.6 Određivanje vremena pada mase za poliamid PA 6 dimenzija ispitnih tijela 30 x 30 x 20 mm

Tablica 5.2 Prikaz smanjenja mase nakon sušenja za ispitna tijela debljine 25 i 20 mm

Debljina zupčanika $b = 25$ mm				
Uzorak	Masa prije sušenja, m_1 [g]	Masa nakon sušenja, m_2 [g]	Smanjenje mase zbog sušenja, c [%]	Prosječno smanjenje [%]
1010-1	221,4356	221,176	0,1173	0,1304
2003-1	234,7578	234,444	0,1334	
2005-1	234,198	233,895	0,1293	
3003-1	213,202	212,885	0,1485	
3005-1	212,7124	212,450	0,1234	
Debljina zupčanika $b = 20$ mm				
1010-2	125,9282	125,711	0,1726	0,1846
2003-2	116,8248	116,586	0,2042	
2005-2	117,0194	116,789	0,1967	
3003-2	131,3556	131,096	0,1973	
3005-2	131,7646	131,564	0,1525	



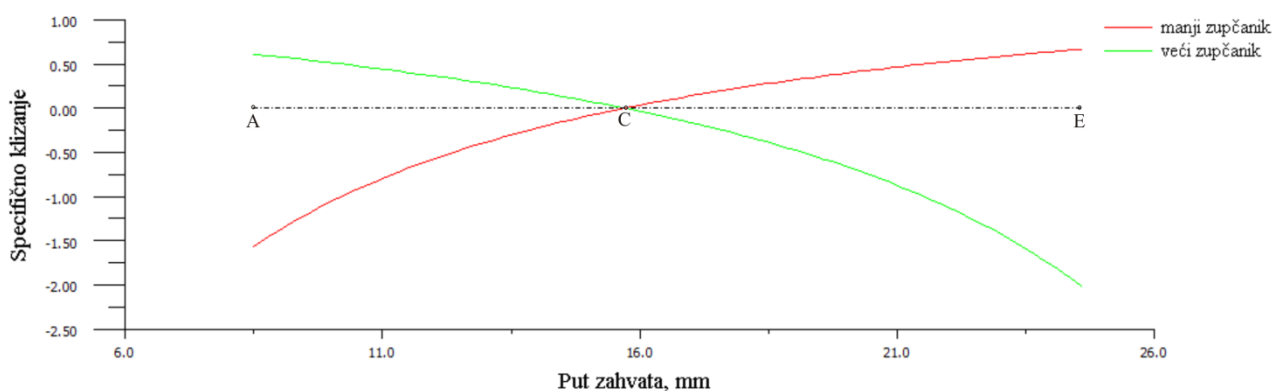
Slika 5.7 Vaga za mjerenje mase PRJ 1200-3N proizvođača Kern & Sohn GmbH

Simulacija utjecajnog faktora stanja materijala na ispitni materijal, podijeljen je na stanja:

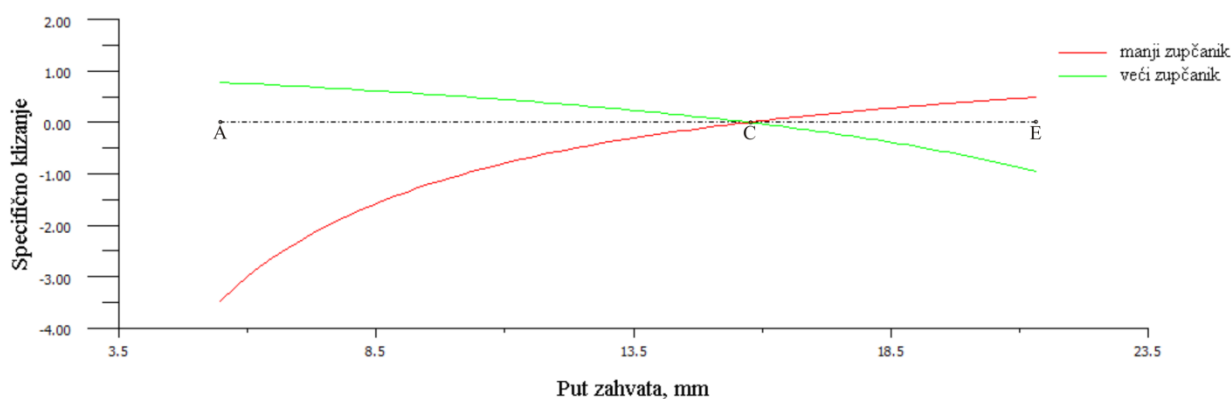
- sušeno – ispitni zupčanici nakon izrade sušeni su pri temperaturi od 70 °C u trajanju od 12 dana, te se nakon hlađenja u eksikatoru provode ispitivanja prema planu pokusa (poglavlje 5.3);
- netretirano – ispitni zupčanici nakon izrade nalaze se pri sobnoj temperaturi prije ispitivanja;
- kondicionirano – ispitni zupčanici nakon izrade tretiraju se u vodi pri temperaturi 70 °C, u trajanju od 12 dana te se nakon vađenja brišu radi odstranjivanja vode s površine.

5.2.1.2 Određivanje pomaka profila

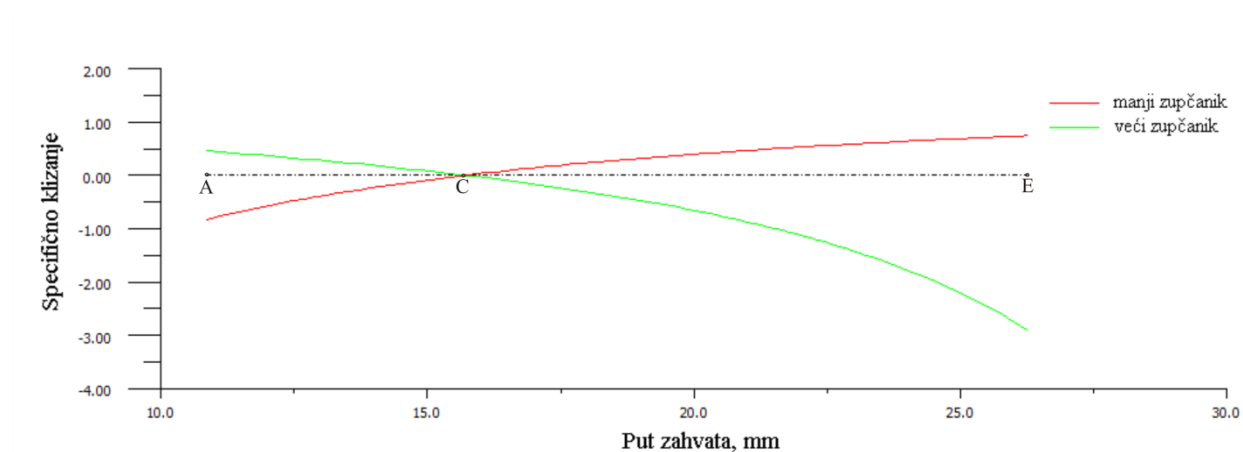
Pomakom profila utječe se na promjenu debljine zuba. Pozitivni pomak povećava debljinu zuba dok negativnim pomakom se smanjuje debljina zuba. Pozitivnim pomakom smanjuje se debljina tjemena zuba dok istovremeno dolazi do povećanja podnožja zuba. Time su osigurani povoljniji uvjeti klizanja i veća opteretivost. Maksimalni pomaci profila ograničeni su traženim osnim razmakom i zašiljenošću zuba, gdje minimalna debljina zuba iznosi $s_a = 0.4 \cdot m$ za nezakaljene metalne zupčanike. Korekcijom pomaka profila utječe se na promjenu tjemelog i podložnog promjera, a time i na brzine klizanja tijekom zahvata. Određivanje varijacija pomaka profila izvršeno je prema ujednačenim brzinama klizanja za mali i veliki zupčanik (Slika 5.8), maksimalnoj zašiljenosti tjemena manjeg zupčanika (Slika 5.9), odnosno većeg zupčanika (Slika 5.10).



Slika 5.8 Varijacija optimalnih brzina klizanja, pomak profila J_1



Slika 5.9 Varijacija prema maksimalnoj podrezanosti zupčanika $z = 23$ zuba, pomak profila J_2



Slika 5.10 Varijacija prema maksimalnoj podrezanosti zupčanika, $z = 27$ zuba, pomak profila J_3

Izborom takvih odnosa brzina klizanja, osigurat će se nejednoliko klizanje tijekom zahvata, što će se očitovati promjenom točke valjanja po zahvatnoj crti, te u interakciji s ostalim radnim parametrima, utjecati na radni vijek zupčanika.

5.3 Parametri pokusa

Ograničenja ispitnog postolja, uz ograničenost simuliranja pojedinih radnih stanja pokusa provedena su ispitivanja prema plošno centralno kompozitnom planu pokusa (CCF) s tri faktora (poglavlje 5.2). Upotrijebljen je softverski program *Design Expert* modulom ANOVA (analiza varijance). Prema prethodno određenim granicama uz utjecajne faktore, prema poglavlju 5.1, određene su razine faktora prema Tablici 5.3.

Pri čemu je :

A - opterećenje, $T = 20$ do 30 Nm;

B - pomak profila: J_1, J_2, J_3 ;

C - stanje materijala: sušeno, netretirano, kondicionirano.

Tablica 5.3 Faktori i njihove razine

Razina	Opterećenje T , Nm	Pomak profila J , mm	Stanje materijala
1	30	$J_2 (x_1 = -0,2272 \ x_2 = 0,2272)$	Sušeno
0	25	$J_1 (x_1 = 0,0849 \ x_2 = -0,0849)$	Netretirano
-1	20	$J_3 (x_1 = 0,2956 \ x_2 = -0,2956)$	Kondicionirano

Stanja pokusa prema Tablici 5.4 prikazuju ispitne parametre koje je potrebno simulirati za svaki pojedini ispitni zupčani par. Plan pokusa raspodijeljen je tako da postoje šest ponavljanja u središtu te jedno ponavljanje u osima i vrhovima, što daje 20 kombinacija stanja pokusa. Prema određenim ispitnim parametrima provodi se ispitivanje do zadovoljavanja određenih uvjeta.

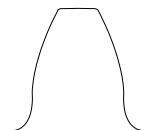
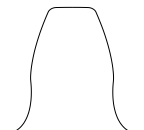
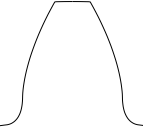
Tablica 5.4 Plan pokusa

		Faktor A: Opterećenje T [Nm]		Faktor B: Pomak profila J , [mm]		Faktor C: Stanje materijala	
Pokus broj	Ispitna oznaka	Razina	Stvarna vrijednost	Razina	Stvarna vrijednost	Razina	Stvarna vrijednost
1	3003	-1	20	-1	J_3	1	Sušeno
2	1011	0	25	0	J_1	0	Netretirano
3	2004	0	25	1	J_2	0	Netretirano
4	2005	1	30	1	J_2	1	Sušeno
5	3001	1	30	-1	J_3	-1	Kondicionirano
6	1012	0	25	0	J_1	0	Netretirano
7	3005	1	30	-1	J_3	1	Sušeno
8	3004	0	25	-1	J_3	0	Netretirano
9	1003	0	25	0	J_1	-1	Kondicionirano
10	1008	0	25	0	J_1	0	Netretirano
11	1010	0	25	0	J_1	1	Sušeno
12	1004	1	30	0	J_1	0	Netretirano
13	2002	-1	20	1	J_2	-1	Kondicionirano
14	1006	0	25	0	J_1	0	Netretirano
15	2003	-1	20	1	J_2	1	Sušeno
16	1007	0	25	0	J_1	0	Netretirano
17	2001	1	30	1	J_2	-1	Kondicionirano
18	1005	-1	20	0	J_1	0	Netretirano
19	1009	0	25	0	J_1	0	Netretirano
20	3002	-1	20	-1	J_3	-1	Kondicionirano



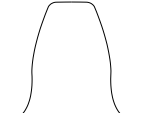
5.3.1 Ispitni zupčanici

Osiguravanje stanja pokusa za provedbu ispitivanja, prema Tablici 5.4, izvršeno je kombinacijom mehaničkih, geometrijskih značajki i sastava materijala. Stanja pokusa za faktor A, prema Tablici 5.4, osigurano je s pomoću ispitnog postolja, dok je stanje materijala (faktor C) postignut tretiranjem ispitnog tijela. Ispitno stanje pokusa (faktor B) odnosi se na geometrijske varijacije ispitnog tijela te ima izravan utjecaj kod izrade ispitnih tijela (zupčanika). Ispitni zupčanici ograničeni su veličinom te mogućnostima ispitnog postolja. Ograničenja koja su utjecala na izradu ispitnih zupčanika odnose se na zadani osni razmak, prijenosi omjer, te broj zubi zupčanika, odnosno modul zupčanika. Materijal ispitnih zupčanika je ekstrudirani poliamid (PA 6), proizvođača *Zell-Metall Ges.m.b.H* (Austrija), mehaničkih svojstava prema [91]. Definiranim parametrima proizašlih iz ispitnog postolja te prema zahtijevanim pomacima profila (poglavlje 5.2.1.2), određene su ostale geometrijske karakteristike (Tablicama 5.5 i 5.6) za zadane pomake profila, i plan pokusa (Tablica 5.4).

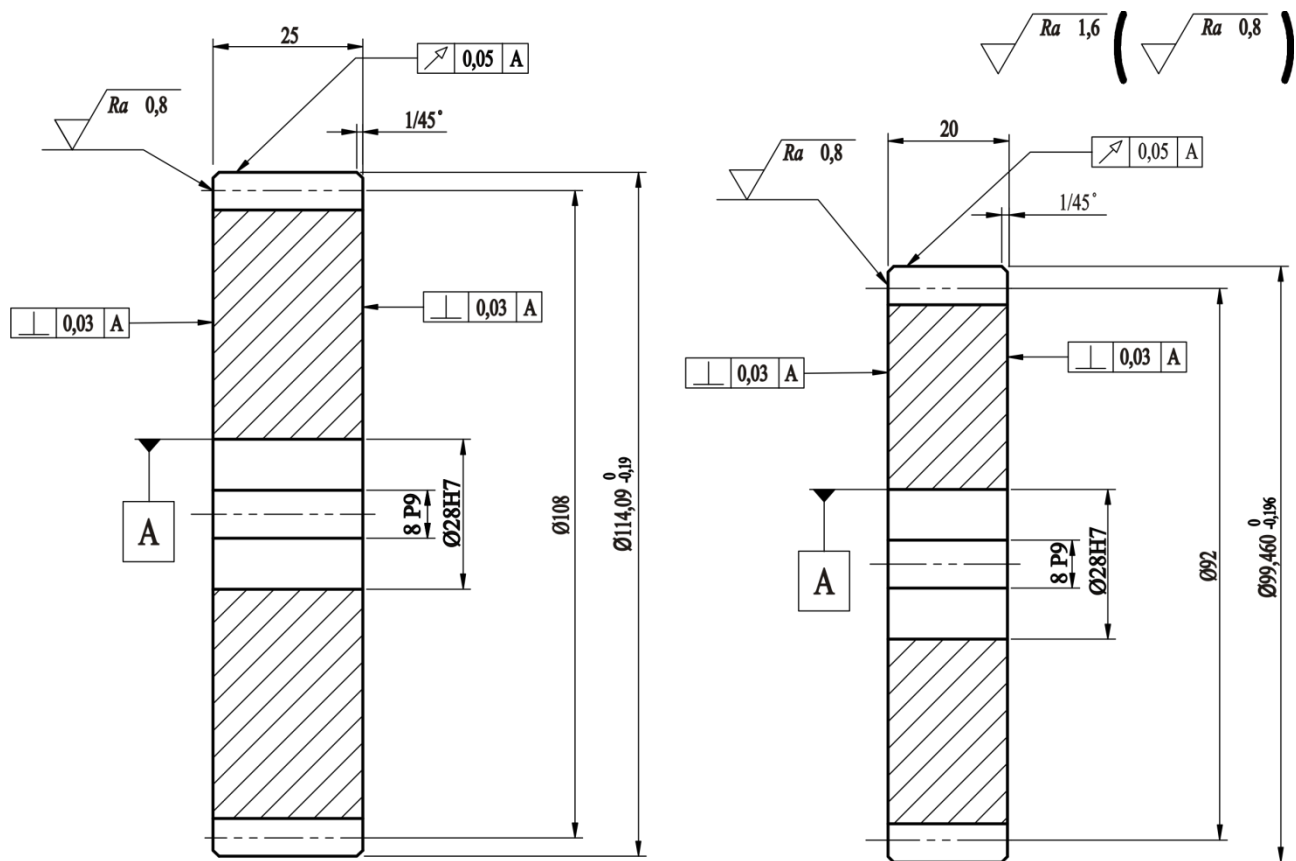
Tablica 5.5 Podaci o varijacijama manjeg zupčanika (duljine u mm)

Parametar	Oznaka	Pomak profila J_1	Pomak profila J_2	Pomak profila J_3
Broj zubi	z	23	23	23
Modul	m	4		
Kut profila	α_n	20°		
Osnovni profil ozubljenja		DIN 3972 II		
Polumjer zaobljenja podnožja ozubnice	ρ_{fp}	0,20 · m		
Kut nagiba boka	β	0		
Diobeni promjer	d	92		
Promjer temeljne kružnice	d_b	86,452	86,452	86,452
Faktor pomaka profila	x_l	0,0849	-0,2272	0,2956
Visina zuba	h_t	9		
Promjer podnožne kružnice	d_f	82,679	80,183	84,365
Promjer tjemene kružnice	d_a	100,679	98,183	102,365
Pogonski kut zahvata	α_w	20°		
Promjer kinematske kružnice	d_w	92		
Kvaliteta/područje tolerancija prema DIN 3967	-	6 b26		
Debljina zuba na diobenoj kružnici	s	6,530	5,622	7,144
Mjerni broj zubi	z_w	2	2	2
Mjera preko zubi	W_{kmax}	18,816	17,962	19,392
	W_{kmin}	18,749	17,895	19,325
Tolerancija razmaka osi	-	Js7 ($A_s = \pm 0.02$)		
Razmak osi	a	100.00		
Izgled zuba	-			

Tablica 5.6 Podaci o varijacijama većeg zupčanika (duljine u mm)

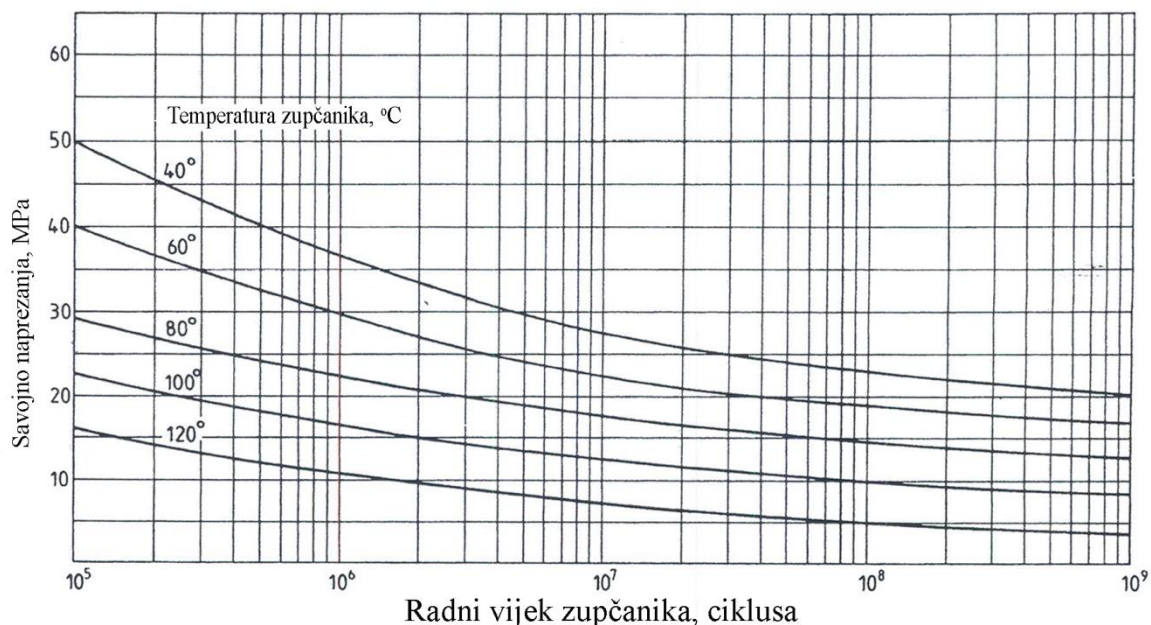
Parametar	Oznaka	Pomak profila J_1	Pomak profila J_2	Pomak profila J_3
Broj zubi	z	27	27	27
Modul	m	4		
Kut profila	α_n	20°		
Osnovni profil ozubljenja		DIN 3972 II		
Polumjer zaobljenja podnožja ozubnice	ρ_{fp}	0,20 · m		
Kut nagiba boka	β	0		
Diobeni promjer	d	108		
Promjer temeljne kružnice	d_b	101,487	101,487	101,487
Faktor pomaka profila	x_l	-0,0849	0,2272	-0,2956
Visina zuba	h_t	9		
Promjer podnožne kružnice	d_f	97,321	99,817	95,635
Promjer tjemene kružnice	d_a	115,321	117,817	113,635
Pogonski kut zahvata	α_w	20°		
Promjer kinematske kružnice	d_w	108		
Kvaliteta/područje tolerancija prema DIN 3967	-	6 b26		
Debljina zuba na diobenoj kružnici	s	6,036	6,946	5,423
Mjerni broj zubi	z_w	2	2	2
Mjera preko zubi	W_{kmax}	18,574	19,427	17,997
	W_{kmin}	18,508	19,362	17,932
Tolerancija razmaka osi	-	Js7 ($As = \pm 0.02$)		
Razmak osi	a	100.00		
Izgled zuba	-			

Izrada ispitnih zupčanika provedena je postupkom odvalnog glodanja alatom prema DIN 8000, materijal za izradu uzoraka je ekstrudirani poliamid (PA 6) tvorničkog naziva *Zelamid 202*, proizvođača *Zell-Metall Ges.m.b.H* (Austrija). Ispitna tijela izrađivana su iz dva različita trupca, promjera 110 i 120 mm, dužine 1 m. Priprema uzoraka provedena je tako da su najprije izrezivani pripremljeni debljine 20, odnosno 25 mm te se nakon toga pristupilo izradi svakog pojedinog ispitnog zupčanika, prema planu pokusa, odnosno varijacijama pomaka profila (Tablica 5.5 i 5.6) i crtežu, prema Slici 5.11. Manji ispitni uzorci izrađivani su iz trupca promjera 110 mm dok su veći zupčanici izrađivani iz trupca promjera 120 mm. Mjerenjem je utvrđena razlika tvrdoća između ispitnih trupaca u iznosu od 0,78 shore D, što potvrđuje zanemarive razlike u ispitnom materijalu.

Slika 5.11 Crtež ispitnih zupčanika prema varijaciji pomaka J_1

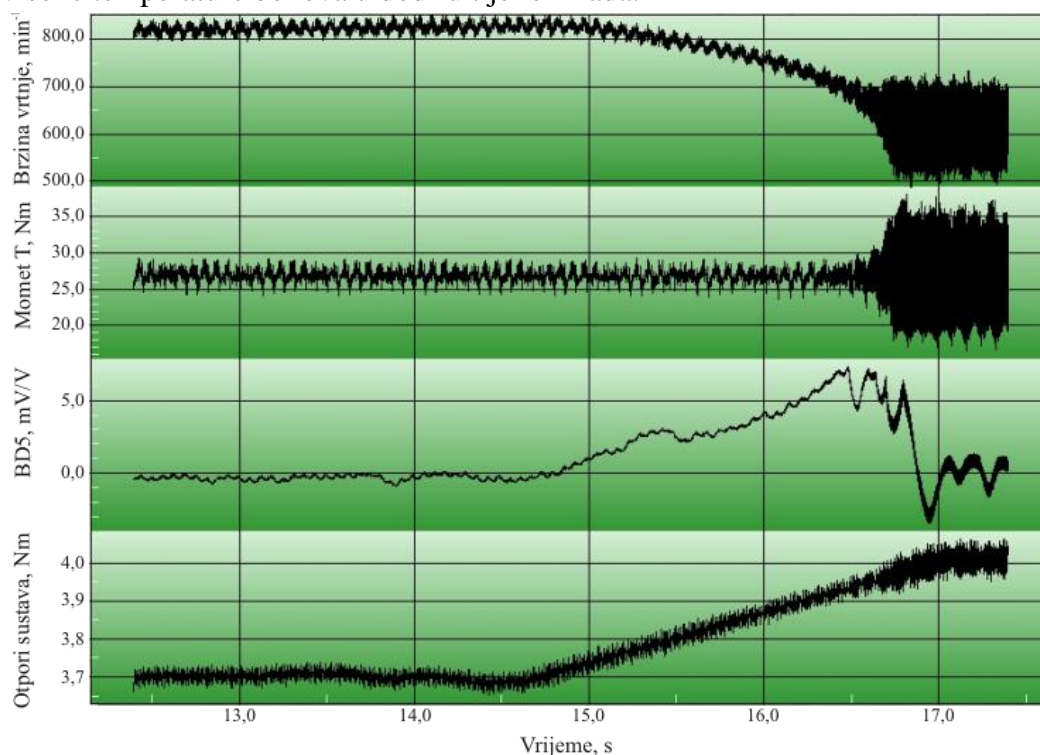
5.3.2 Kriteriji zadovoljavanja radnog vijeka polimernih zupčanika

Ispitivanja prema planu pokusa (Tablica 5.4) provedena su do zadovoljavanja kriterija na osnovi određenih pretpostavki. Pri visokim opterećenjima polimernih prijenosnika od PA 6 vjerojatnije će doći do loma zuba prije negoli do loma nastalog trošenjem [71] u slučaju kad ne postoji podmazivanje. Prema normi ISO 6336-3 za konstrukcijske čelike, provedba ispitivanja određivanja faktora trajnosti predstavlja 99% vrijednost ostvarivanja $3 \cdot 10^6$ ciklusa opterećenja na pulzatorima. Razlikujemo tri područja: statičku čvrstoću ($N_L < 10^3$ odnosno $N_L < 10^4$), vremensku čvrstoću ($10^3 < N_L < 3 \cdot 10^6$, odnosno $10^4 < N_L < 3 \cdot 10^6$), trajna čvrstoća ($N_L > 3 \cdot 10^6$). Poznato je da za PA 6 ne postoji izražena granica vremenske čvrstoće (Slika 5.12) pa je postavljen graničan broj ciklusa provedbe pokusa na osnovi broja ciklusa prema ISO 6336-3 za područje trajne čvrstoće ($N_L > 3 \cdot 10^6$). Zadovoljavanjem broja ciklusa prekida se ispitivanje te se smatra da je ispitno tijelo ostvarilo puni radni vijek prema zadanom cikličkom opterećenju (poglavlje 5.3.3).



Slika 5.12 Savojno naprezanje kod zupčanika od poliamida PA 66, za nepodmazivane zupčanike, modul $m = 3$ mm u sprezi s metalnim zupčanicima

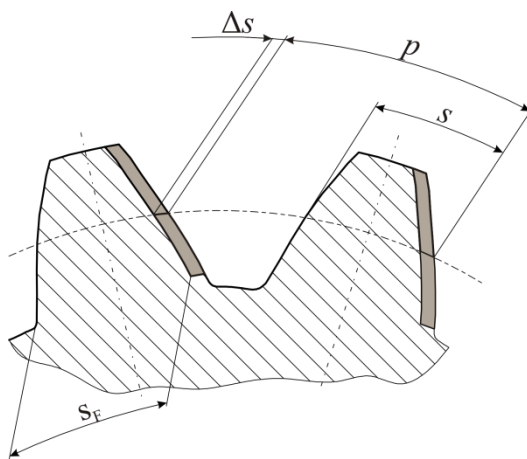
Drugi kriterij zadovoljavanja radnog vijeka tijekom provedbe ciklusa je povećanje otpora do područja zaribavanja, odnosno povećavanja otpora u sustavu do vrijednosti iznad 5 Nm u trajanju od 15 sekundi, odnosno do prestanka mogućnosti prijenosa ispitnog opterećenja (Slika 5.13). Nemogućnost prijenosa ispitnog momenta dovodi od sniženja brzine vrtnje ispitnog uređaja te povećanja amplitude torzijskih vibracija. Trenutno povećanje otpora unutar sustava ne uzima se u obzir tijekom određivanja radnog vijeka, osim ako nije došlo do loma zuba te iznenadnog povećanja otpora (sigurnosna sklopka prekida rad u slučaju prevelikih otpora u sustavu). Ovaj kriterij pokriva lom zuba, odnosno zaglavljivanje zbog loma zuba te temperaturno zaribavanje zupčanika, nastalo zbog previsoke temperature bokova u dodiru tijekom rada.



Slika 5.13 Povećanje otpora u sustavu ispitnog postolja kao rezultat zaribavanja polimernih zupčanika

Treći kriterij odnosi se na detekciju istrošenosti zupčanika. Povećano trošenje polimernih zupčanika dovodi od povećanja savijanja zuba zupčanika u kombinaciji s temperaturom što u konačnici, vodi do loma zuba zupčanika. Zbog relativno male tvrdoće materijala u usporedbi s metalnim zupčanicima, nema potrebe za odvajanjem procesa uhođavanja od procesa trošenja. Inicijalno trošenje obično se javlja vrlo kratko u početnim trenucima rada te ima zanemariv utjecaj na istrošenost zubi tijekom radnog vijeka zubi. Trošenjem bokova zubi dolazi do pojave otpadnih čestica koje nastaju zbog klizanja bokova zubi. Za slučaj rada polimernih zupčanika bez maziva, odvajanje čestica ne utječe na rad zupčanog para. Tijekom rada u ulju potrebno je voditi računa o odvajanju maziva i čestica trošenja zbog mogućeg abrazivnog djelovanja. Ovisno o sustavu podmazivanja, postoji mogućnost utjecaja na kvalitetu rada ležajeva te drugih elementa u sustavu. Kriterij istrošenosti zuba zupčanika provodi se pod pretpostavkom da će doći do smanjenja debljine zuba za veličinu Δs (Slika 5.14), tako da će nakon nekog vremena debljinu zuba biti moguće izraziti prema izrazu:

$$s' = s - \Delta s \quad (5.5)$$



Slika 5.14 Pojednostavnjena slika smanjenja debljine zuba, porastom istrošenosti

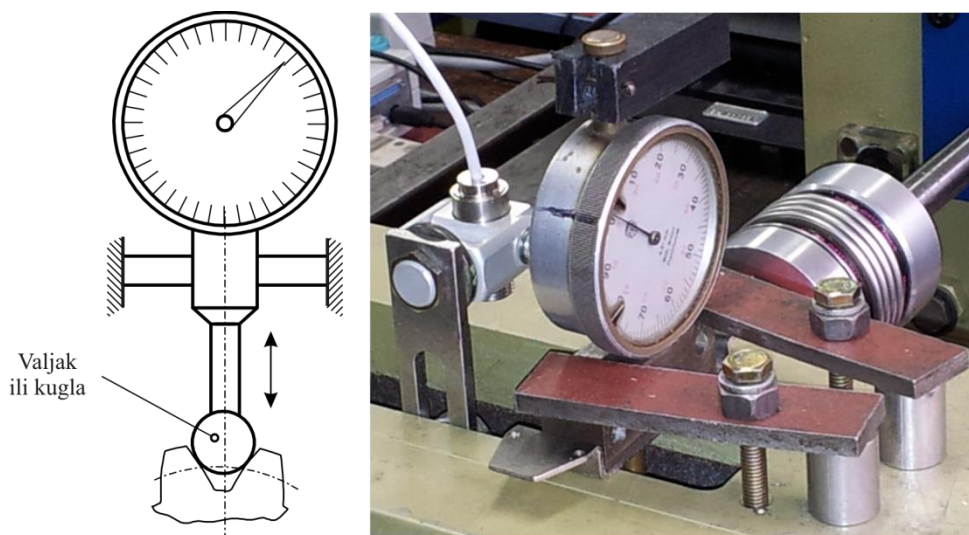
Graničnu debljinu polimernog zupčanika moguće je postaviti prema sigurnosti korijena na lom zuba odnosno prema zašiljenosti zuba. Prvi kriterij ima veću važnost prilikom projektiranja prijenosa snage i gibanja dok graničnu zašiljenost zuba može se povezati s kvalitetom prijenosa. Određivanje granične debljine zuba za nosivost korijena primjenom proračunskog postupka po Nimannu, za temperaturu tijela zupčanika od 100 °C i trajni rad za manji zupčanik iznosi, $\Delta s = 1,391$ mm. Gdje je:

$$\Delta s = \frac{m \cdot \pi}{2} - \frac{T \cdot S_B}{d_w \cdot b \cdot C_{gr}} \quad (5.6)$$

Pri čemu je:

- C_{gr} - značajka čvrstoće materijala kod savijanja korijena zuba, N/mm²
- b - debljina ispitnog tijela, mm
- d_w - promjer kinematske kružnice ispitnog zupčanika, mm
- S_B - sigurnost korijena
- T - ispitni moment, Nmm

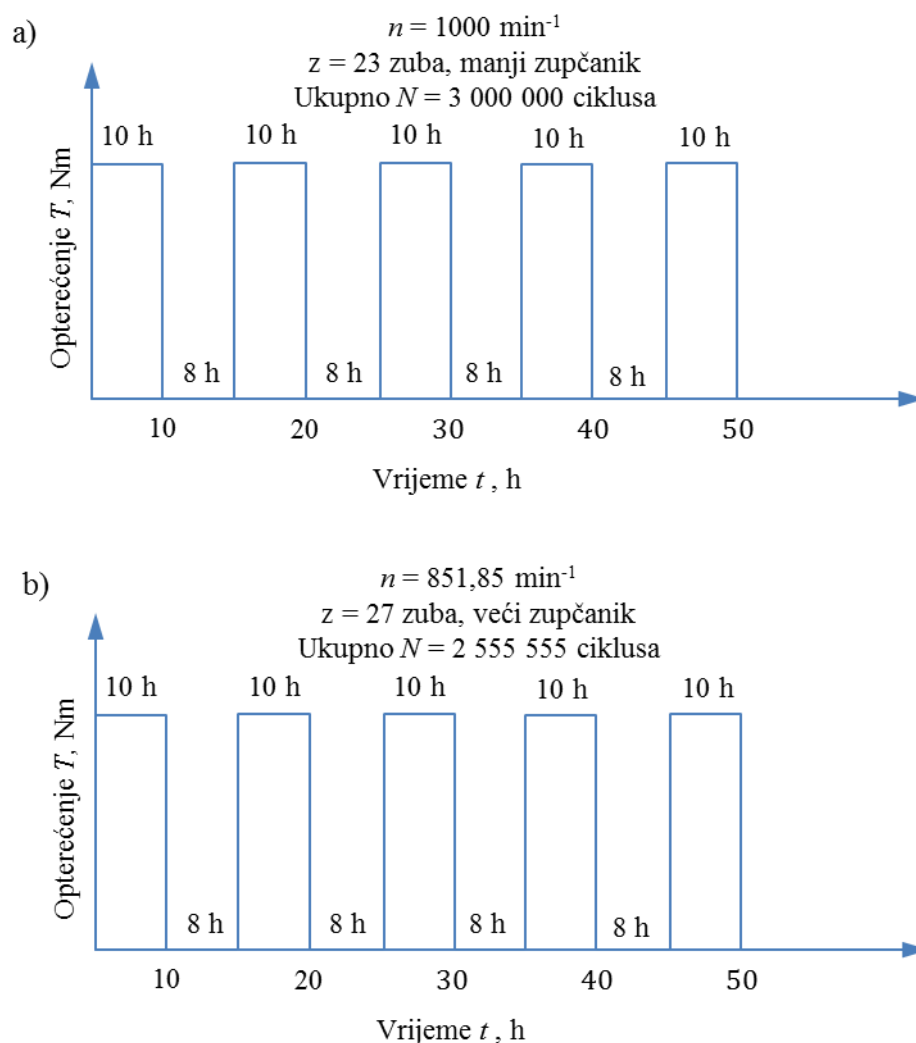
Provjera promjene debljine zuba provodi se periodički svakih 10 sati nakon hlađenja ispitnog postolja, zbog velikog utjecaja temperature na promjenu dimenzije. Mjeri se relativna promjena dubine pomaka ispitnog valjka s pomoću mjerne ure, u odnosu na početno stanje na prethodno označenim uzubinama manjeg zupčanika prema slici 5.15. Osiguravanje ponovljivosti riješeno je s pomoću rotacijske ljestvice smještene na ispitnom vratilu i kućištu.



Slika 5.15 Određivanje istrošenosti zuba

5.3.3 Ciklička ograničenja mjerenja

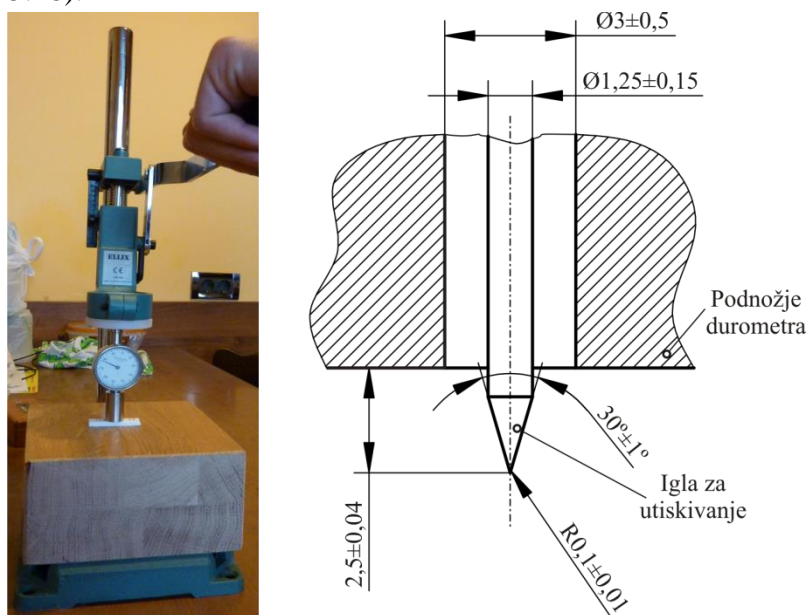
Provedba ispitivanja u maksimalnom ostvarivanju broja ciklusa od $N > 3 \cdot 10^6$ pri brzini vrtnje od $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ za zupčanik od 23 zuba, podijeljena je na prosječno pet cjelina od 600.000 ciklusa po cjelini, dok za veći zupčanik, uz brzinu vrtnje $n = 851 \text{ min}^{-1}$, broj ciklusa po cjelini iznosi 511.111 ciklusa. Između svakog ciklusa, nakon hlađenja u trajanju od 8 sati (Slika 5.16) izvršeno je mjerenje torzijskih vibracija i provjera debljine zuba manjeg zupčanika. Predviđeni ciklus razdijeljen je u pet cjelina, prosječnog trajanja od 10 sati u svrhu omogućavanja određivanja periodičkog istrošenja debljine zuba. Prema [56] trajanje opterećenja dulje od 75 minuta, kod polimernih materijala tijekom ciklusa, smatra se kontinuiranim opterećenjem.



Slika 5.16 Ciklusi provedbe ispitivanja: a) manji zupčanik, b) veći zupčanik

5.3.4 Određivanje tvrdoće

Određivanje utisne tvrdoće provedeno je s pomoću tvrdomjera (tvrdoća prema Shore D), sukladno normi HRN EN ISO 868:2008. Mjerenje se provodi utiskivanjem posebne igle tipa D u ispitno tijelo (Slika 5.17) u definiranim uvjetima prema normi te se mjeri dubina prodiranja igle u tijelo. [92]. Ispitna metoda nije razorna metoda a mjerenje se provodi prije i nakon tretmana ispitnih tijela. Prema HRN EN ISO 868:2008 minimalna debljina ispitnog tijela mora biti 4 mm, čime ispitna tijela, debljine 20, odnosno 25 mm zadovoljavaju traženi uvjet. Mjerenje se provodi postavljanjem durometra u okomiti položaj u odnosu na podlogu ispitnog tijela i drži se utisnuto u trajanju od $15 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$ prije očitavanja. Na ispitnom tijelu potrebno je izvršiti barem 5 mjerenja na različitim pozicijama te odrediti srednju vrijednost. Kalibracija mjernog uređaja provedena je na kalibracijskom uređaju za duromere tipa D, tip uređaja 7501, proizvođača *Zwick GmbH & Co.* (Njemačka) (Slika 5.18).



Slika 5.17 Durometar i izgled igle za mjerenje prema Shore-u D [92]



Slika 5.18 Kalibracijski uređaj za durometre prema Shore-u D

U Tablici 5.7 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće ispitnih zupčanika prije i nakon provedbe eksperimenta. Tretiranjem ispitnih zupčanika dane su vrijednosti tvrdoća prije, te nakon tretmana. Dolazi do povećanja tvrdoće sušenjem ispitnih zupčanika uz srednju vrijednost u iznosu od 2,488 shore D, prema Tablici 5.7. Ispitni zupčanici koji su bili tretirani vodom prema zadanim parametrima (poglavlje 5.2.1.1) pokazali su izniman pad tvrdoće, uz srednju vrijednosti od 11,34 shore D. Nakon provedbe eksperimenta na ispitnim uzorcima mjerena je tvrdoća koja gdje je zabilježen pad tvrdoće kod zupčanika koji su bili sušeni, uz srednju vrijednost u iznosu od 1,88 shore D. Ispitni zupčanici tretirani vodom pokazali su srednje povećanje tvrdoće u iznosu srednje vrijednosti od 1,92 shore D. Netretirani zupčanici nakon provedbe eksperimenta pokazuju tendenciju povećanja tvrdoće prema srednjoj vrijednosti od 1,67 shore D. Odstupanja u tvrdoći nakon provedbe procesa kod ispitnih zupčanika prikazuju pa postoji određeno ubrzanje stabilizacije uzoraka prema radnoj okolini kad su zupčanici u radu. Kod ispitnih zupčanika koji su bili tretirani vodom, stabilizacija je višestruko sporija u usporedbi sa ispitnim zupčanicima koji su bili sušeni.

Tablica 5.7 Promjena tvrdoće ispitnih zupčanika tijekom provedbe eksperimenta

	Stanje materijala [% rh]	Tvrdoća na početku tretmana T_{d1} [Shore D]	Tvrdoća prije početka eksperimenta T_{d2} [Shore D]	Tvrdoća na kraju eksperimenta T_{d3} [Shore D]	Razlika tvrdoće $T_{d2} - T_{d1}$ [Shore D]	Razlika tvrdoće $T_{d3} - T_{d1}$ [Shore D]
Ispitna oznaka	Razina					
1010-2	1	80,1	84,9	81,9	4,8	-3
2003-2	1	81,66	83	81,4	1,34	-1,6
2005-2	1	81,5	83,2	82,2	1,7	-1
3003-2	1	81,6	82,6	81	1	-1,6
3005-2	1	81,2	84,6	82,4	3,4	-2,2
1004-2	0	77,2	77,2	79	0	1,8
1005-2	0	78,6	78,6	83,5	0	4,9
1006-2	0	80,4	80,4	79,5	0	-0,9
1007-2	0	81,1	81,1	80,9	0	-0,2
1008-2	0	80,04	80,04	83,54	0	3,5
1009-2	0	81,34	81,34	82,64	0	1,3
2004-2	0	79,4	79,4	81,6	0	2,2
3004-2	0	80,3	80,3	82,5	0	2,2
1011-2	0	80,5	80,5	81,2	0	0,7
1012-2	0	79,9	79,9	81,1	0	1,2
1003-2	-1	78,5	69,4	69,4	-9,1	0
2001-2	-1	79,1	66,5	69,4	-12,6	2,9
2002-2	-1	77,9	65,3	69,5	-12,6	4,2
3001-2	-1	80,6	70	70,1	-10,6	0,1
3002-2	-1	79,5	67,7	70,1	-11,8	2,4

5.4 Ovisnost promjene mase o radnim parametrima

Simuliranjem različitih stanja vlažnosti prema planu pokusa (Tablica 5.4) dobiveni su različiti uvjeti radnih stanja materijala. Promjenom sadržaja vode u materijalu dolazi do promjene mase, što se odražava i na promjenu tvrdoće ispitnih zupčanika. U Tablici 5.8 prikazani su rezultati mjerenja promjena mase u odnosu na stanje ispitnih zupčanika prije provedbe testiranja (nulto stanje, M_2) te nakon provedbe ispitivanja (M_3). Prikazani rezultati odnose se samo na manje ispitne zupčanike. Negativne vrijednosti mase su očekivane zbog pojave trošenja te odvajanja čestica materijala tijekom rada zupčanog para. Veća promjena mase ukazuje na veće odvajanje čestica materijala te ukazuje na pojavu intenzivnog trošenja tijekom rada za pojedine radne parametre.

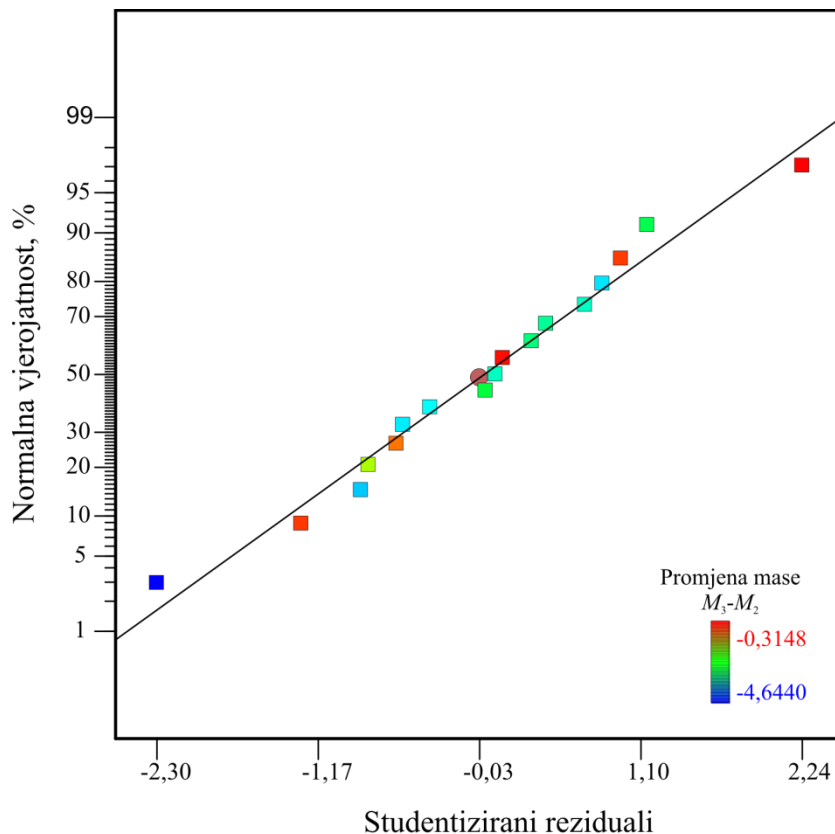
Tablica 5.8 Rezultati promjena mase i broja ciklusa za različita stanja pokusa

	Faktor A: Opterećenje T [Nm]	Faktor B: Pomak profila J_i [mm]	Faktor C: Stanje materijala [% rh]	Razlike masa M_3 - M_2 [g]	Ostvareni broj ciklusa N
Ispitna oznaka	Razina	Razina	Razina		
2003	-1	1	1	-0,365	3073491,5
1011	0	0	0	-3,538	1218097,1
3004	0	-1	0	-3,3166	1043568,9
3005	1	-1	1	-2,807	118623,6
2001	1	1	-1	-0,563	268,6
1012	0	0	0	-3,3014	1145783,9
2005	1	1	1	-3,0084	182784,3
2004	0	1	0	-3,6706	277540,6
1003	0	0	-1	-3,1176	6666,7
1008	0	0	0	-5,2124	1777956,4
1010	0	0	1	-3,6364	1209201,1
1004	1	0	0	-1,7472	116236,6
3002	-1	-1	-1	-2,7358	4080,1
1006	0	0	0	-3,7892	604037,8
3003	-1	-1	1	-0,8104	3057606,5
1009	0	0	0	-5,5468	526277,7
3001	1	-1	-1	-0,5456	244,9
1005	-1	0	0	-0,3148	3072257,8
1007	0	0	0	-0,2676	3071636,0
2002	-1	1	-1	-4,644	126582,7

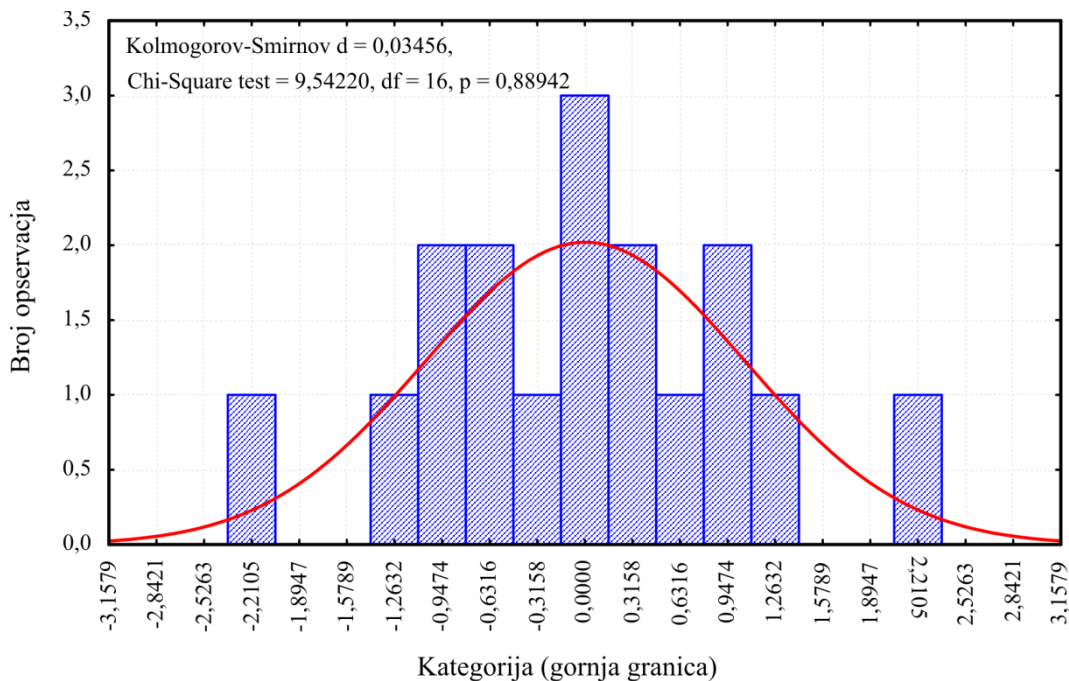
Vrijednosti u Tablici 5.8 koje su precrtane nisu uzimane u statističku analizu.

Papir vrijednosti ostataka većinom je raspodijeljen po normalno razdiobi, to je vidljivo na Slici 5.19. Vidljiva su odstupanja na rubovima grafova, što znači da je vjerojatnost pojave tih slučajeva relativno mala. Obično se takvi pokusi ponavljaju ili se primjenjuju statistički alati koji otkrivaju nešto više informacija o razlozima njihova pojavljivanja. Normalna raspodjela ostataka modela svojevrzni je pokazatelj korektnosti provedbe ispitivanja. Provedena dva statistička testa

Kolmogorov - Smirnov test (K-S test) i provjera varijance χ^2 - testom, rezultati su prikazani histogramom na Slici 5.20.



Slika 5.19 Papir vjerojatnosti ostataka po normalnoj razdiobi predloženog modela



Slika 5.20 Kolmogorov – Smirnov i χ^2 test provjere normalnosti ostataka modela

Provedeni rezultati testova, prema Slici 5.20, potvrđuju normalnost ostataka i ukazuju da je statistički model valjan za opisivanje rezultata pokusa. Tijekom provedbe testova izostavljane su pojedine vrijednosti prema Tablici 5.8 zbog prevelikog odstupanja od opisanog modela, a odnose se

na tri ispitna tijela, a sva su nastala zbog teškog zaribavanja, dok je treća vrijednost nastala zbog nemjerljive promjene mase nakon prestanka rada.

Tablica 5.9 Analiza varijance rezultata razlike masa

Izvor varijabilnosti	Suma kvadrata odstupanja SS	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja S^2	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0 P
Model	28,88	5	5,78	18,06	< 0,0001
Faktor B	0,41	1	0,41	1,30	0,2793
AC	14,88	1	14,88	46,52	< 0,0001
BC	0,59	1	0,59	1,84	0,2022
A^2	11,84	1	11,84	37,00	< 0,0001
B^2	0,71	1	0,71	2,23	0,1633
Ostatak	3,52	11	0,32		
Odstupanje od modela (e. <i>Lack of fit</i>)	3,40	9	0,38	6,35	0,1434
Čista pogreška	0,12	2	0,060		
Ukupno	32,40	16			

Analiza varijance pokusa odstupanja mase dana je u Tablici 5.9, gdje je prikazan utjecaj pojedinog člana modela na promjenu mase. Analiza je pokazala da postoji utjecajnost modela, odnosno da postoji dio varijabilnosti funkcijskih veličina kojima se može opisati razlika mase, uzimanjem u obzir ispitivanih faktora. Iznosi P vrijednosti manje od 0,001, ukazuje na veliku utjecajnost pojedinog izvora varijabilnosti, od ukupno devet članova u kvadratnom modelu. Samo dva člana modela pokazuju značajan utjecaj na promjenu mase, a to su AC i A^2 članovi. Od ostalih članova, prema Tablici 5.9, ne postoji značajniji utjecaj na model, ali su pojedini članovi zadržani u modelu jer utječu na povećanje točnosti modela. Analiziranjem se može uočiti da linearni utjecajni članovi ispitnih faktora nemaju značajniji utjecaj na ponašanje modela dok je uočen veliki utjecaj interakcije faktora A s faktorom C na izlazni model. To potvrđuje utjecajnost opterećenja (faktor A) i stanja materijala (faktor C) na razliku masa. Kombiniranjem tih faktora utječe se na promjenu mase tijekom radnog vijeka zupčanih parova. Očekivano je bilo da promjenom faktora pomaka profila (faktor B) postoji značajniji utjecaj na promjenu mase, a ispostavilo se da u ovom rasponu ispitnih parametara ne dolazi do izražaja. Faktor opterećenja (A) s kvadratom isto tako pokazuje značajan utjecaj na promjenu mase, što dovodi do zaključka da je moguće samim povećanjem opterećenja utjecati na promjenu mase, odnosno na povećanje trošenja tijekom radnog vijeka zupčanog para.

Ukupna pogreška modela prema [93] sastoji se od čiste pogreške i odstupanja modela. U slučaju odstupanja mase udjel odstupanja suma kvadrata ukupne pogreške i suma kvadrata čitavog modela iznosi 10,86 %. Vrlo važnu informaciju o udjelu varijabilnosti modela za razlike masa interpretiramo običnim koeficijentom determinacije što u ovom slučaju iznosi $R^2 = 0,8914$. Time je potvrđen udjel od 89,14 % varijabilnosti razlike masa, objašnjiv s tri ispitna faktora, opterećenjem, pomakom profila te udjelom vode u materijalu. Prilagođenim koeficijentom determinacije $R^2_{\text{pril}} = 0,8420$ pokazana je mjera koliko je utjecajnih faktora uzeto u obzir. Vrijednosti običnog koeficijentom determinacije R^2 raste dodavanjem faktora bez obzira na utjecaj odabranog faktora dok se R^2_{pril} smanjuje dodavanjem neutjecajnih faktora, te je uvijek manji ili jednak R^2 . Iznos od 84,2 % govori da su utjecajni faktori dobro odabrani, ali da ujedno postoje manje utjecajni faktori

koji su uključeni u model. Predviđajućim koeficijentom determinacije $R^2_{\text{pred}} = 0,7031$ prikazano je da je udjel od 70,31 % dobivenih podataka eksperimentalnim modelom moguće objasniti predviđajućim modelom za promjenu masa tijekom radnog vijeka zupčanika. Takav rezultat primjenjiv je za okvirno određivanje predviđene istrošenosti do zadovoljavanja radnog vijeka. No, ipak je potrebno naglasiti da zbog nepotpunosti samog modela, model daje rezultate koje valja koristiti samo unutar njegovih granica pouzdanosti.

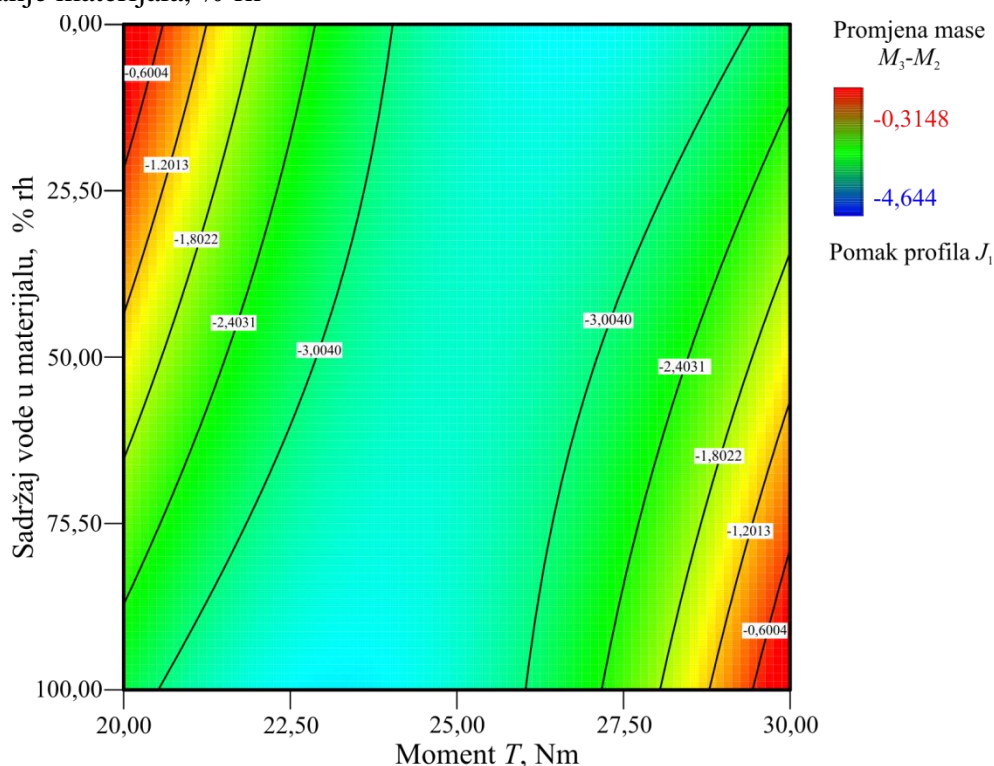
5.4.1 Predloženi model promjene masa zupčanika od poliamida (PA 6)

Prema provedenom centralno kompozitnom planu pokusa (CCD) s tri numerička faktora za provedena mjerenja mase prije i nakon provedbe eksperimenta u danom rasponu ulaznih podataka prema Tablici 5.8 dobiven je model koji opisuje podatke prema prethodnom poglavlju 5.4 pomoću jednadžbe 5.7

$$\Delta m = -3,34 - 0,2 \cdot B - 1,36 \cdot A \cdot C + 0,27 \cdot B \cdot C + 1,98 \cdot A^2 - 0,49 \cdot B^2 \quad (5.7)$$

pri čemu je

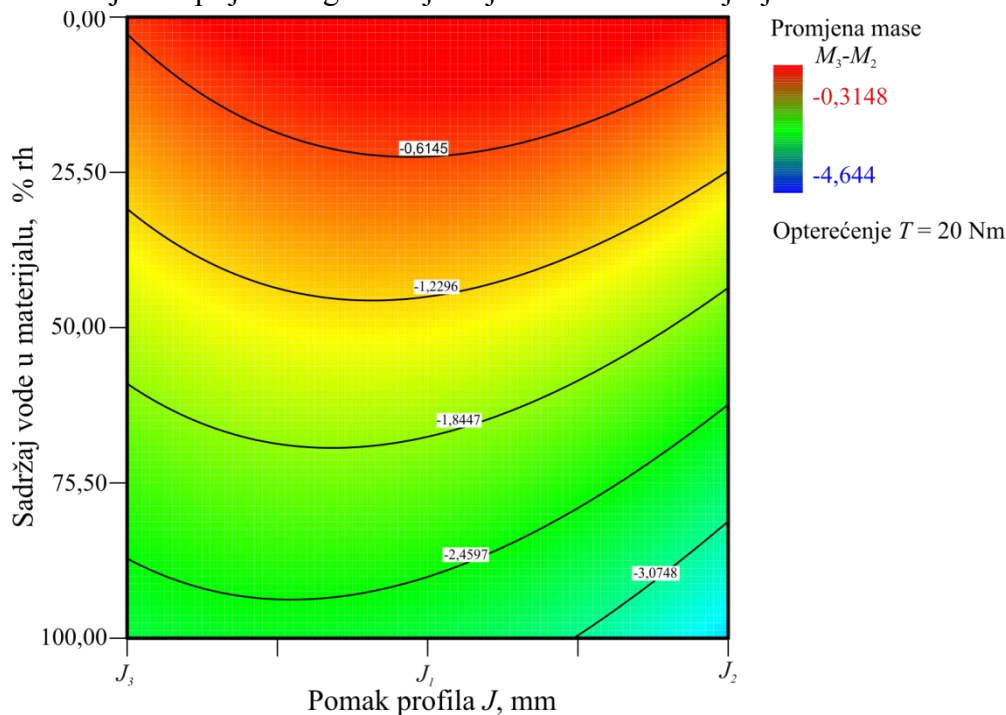
- Δm - očekivana promjena mase, g
- A - opterećenje T , Nm
- B - promjena pomaka profila, J_1 , mm
- C - stanje materijala, % rh



Slika 5.21 Grafički prikaz promjene razlika masa u ovisnosti opterećenja i vlage

Slikom 5.21 dan je grafički prikaz promjene mase iz koje se može zaključiti da smanjenjem opterećenja i smanjivanjem udjela vode u materijalu, utječe se na manju promjenu mase tijekom životnog vijeka, što se može poistovjetiti s povećanjem otpornosti zupčanika na trošenje. Pogreška koja je prisutna u mjerenjima odnosi se na promjenu mase nastale zbog promjene radnih uvjeta, odnosno na promjenu mase prouzročene promjenom vlage tijekom mjerenja. Zbog sporosti procesa

promjene mase zbog promjene radnih uvjeta u odnosu na dužinu maksimalnog ciklusa od $3 \cdot 10^6$ ciklusa što traje oko 50 h kod brzine vrtnje od $n = 16 \text{ s}^{-1}$, moguće je zaključiti da je utjecaj promjene mase zanemariv. Smanjivanje razlike masa pri višim opterećenjima u kombinaciji s višim postotkom vode u materijalu, može se objasniti utjecajem vode na materijal te smanjivanjem tvrdoće [31] što u kombinaciji s visokim opterećenjem izaziva visoke površinske pritiske, i dolazi do brzog zaribavanja bez prijelaznog trošenja koje dovodi do smanjenja mase.



Slika 5.22 Grafički prikaz promjene razlika masa u ovisnosti o pomaku profila i vlazi

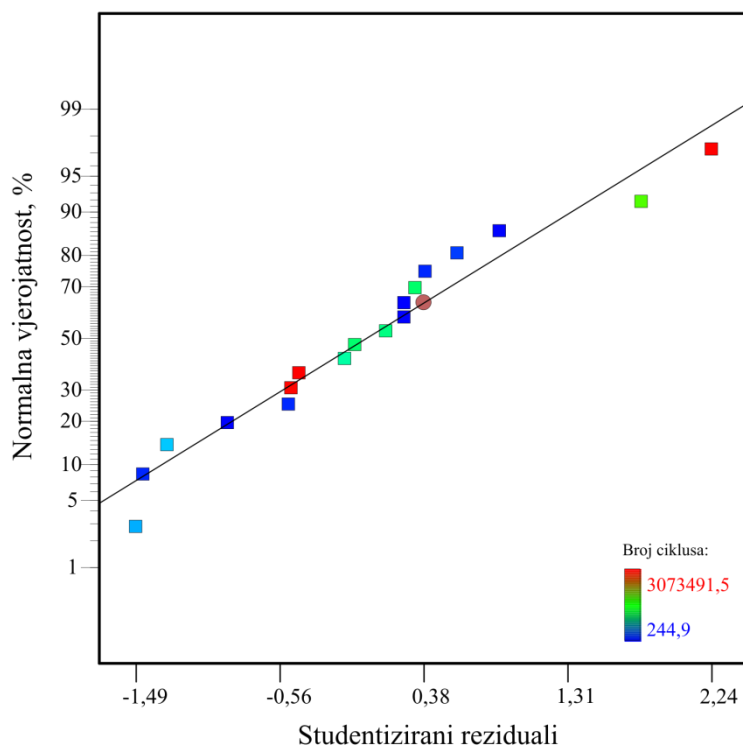
Promjenom pomaka profila, prema Slici 5.22, neće se značajnije utjecati na razliku masa, te je izraženija promjena mase prema promjeni udjela vlage u materijalu. Moguće je zamijetiti malo smanjenje promjene mase kod pomaka profila (J_3) koji se odnose na maksimalnu podrezanost većeg zupčanika, (Slika 5.10) u odnosu na J_2 (Slika 5.9). To može biti posljedica manjih brzina klizanja kod manjeg ispitnog zupčanika u odnosu na brzinu klizanja većeg, zato što su za mjerenje uzete u obzir razlike masa manjeg ispitnog zupčanika. Pomak profila prema Slici 5.22 u području J_1 do $-0,5 J_3$ pokazuje najmanji razliku masa, to ukazuje da područje gornje polovice pomaka profila od J_3 do J_1 daje najmanju promjenu mase za cijelo područje promjene vlage u materijalu. Gubitak materijala na zupčanicima tijekom rada bit će najmanji u tom području pomaka profila, uz vjerojatnost od 70,31% da model dobro opisuje rezultate pokusa.

5.5 Ovisnosti ulaznih veličina na ostvoreni broj ciklusa polimernih zupčanika

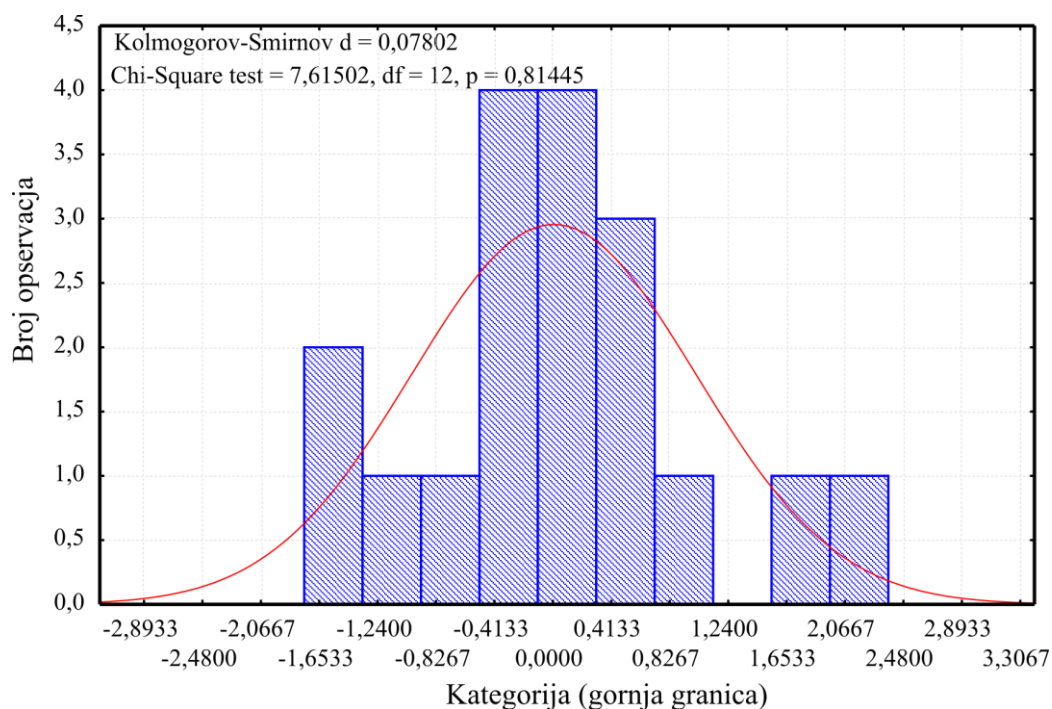
Glavnina pokusa provedena je u svrhu određivanja očekivanog radnog vijeka za različite parametre koji se mogu javiti tijekom eksploatacije polimernih zupčanika. Prema planu pokusa (Tablica 5.4) dobiveni su različiti uvjeti radnih stanja materijala. Interakcijom parametara dobiveni su ostvoreni ciklusi pri brzini od $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ manjeg zupčanika ($z_1 = 23$) dok su ostvoreni ciklusi većeg zupčanika manji zbog većeg broja zuba ($z_2 = 27$), odnosno manje brzine vrtnje. Prema

kriterijima zadovoljavanja radnog vijeka (poglavlje 5.3.2) provedenog u ispitivanju, dobiven je broj ciklusa manjeg zupčanika prikazan u Tablici 5.8.

Papir vrijednosti ostataka većinom je raspodijeljen po normalnoj razdiobi. Prikazani su Slikom 5.23. Moguće primijetiti veće odstupanje vrijednosti u gornjem dijelu grafa, što ukazuje na manju zastupljenost tih vrijednosti u rezultatima. Provedena su i dva statistička testa Kolmogorov - Smirnov test (K-S test) i provjera varijance χ^2 - testom rezultati su prikazani histogramom na Slici 5.24

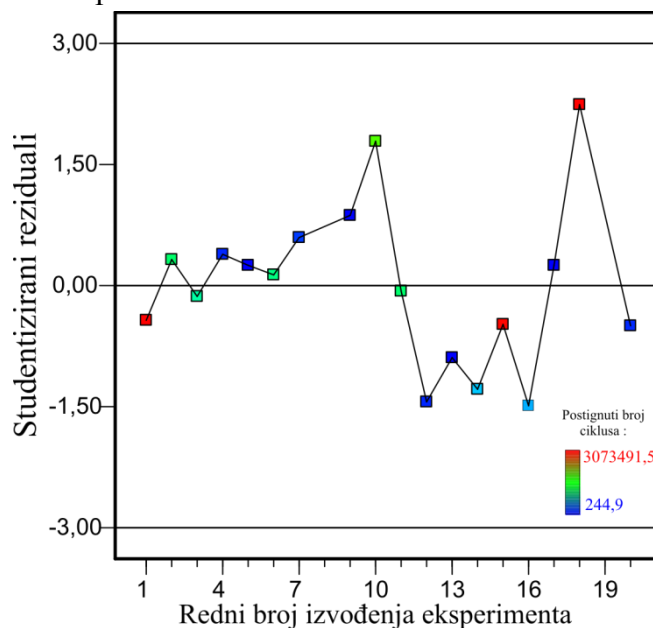


Slika 5.23 Papir vjerojatnosti ostataka prema normalnoj razdiobi predloženog modela ostvarenog broja ciklusa



Slika 5.24 Kolmogorov – Smirnov i χ^2 test provjere normalnosti ostataka modela ostvarenog broja ciklusa

Potpuna provjera ostataka prema Slici 5.25, prikazuje da ne postoji ostatak koji prelazi određene granice vjerojatnosti. Time je potvrđeno da za odabrane podatke slučajna greška nema prepoznatljivu strukturu. U Tablici 5.8 izuzete su vrijednosti dvaju parametara koji su postizali odstupanje od granica vjerojatnosti. Zbog relativno malog broja izuzetih vrijednosti ne može se reći da su nekontrolirani faktori utjecali bitno na ishod pokusa. Odabrani podaci koji ne prolaze crnu liniju (3,00 i -3,00) na Slici 5.25 uključeni su u opisivanje modela. Nepravilnošću strukture dijagrama ne može se prepoznati nikakva pravilna struktura te je to pokazatelj da je postignuta nasumičnost tijekom provedbe pokusa.



Slika 5.25 Graf ostataka kao funkcija rednog broja izvođenja pokusa za model ostvarenog broja ciklusa

Analizom varijance prema Tablici 5.10 pokazana je utjecajnost pojedinih faktora na ukupni životni vijek. Utjecajni parametri koji imaju P vrijednost manju od 0.01%, prema Tablici 5.10 ukazuju da utjecaj opterećenja (faktor A) i utjecaj vlage (faktor C) imaju najviše utjecaja. Pomak profila (faktor B) nije pokazao značajniji utjecaj i izbačen je iz daljnje analize. Dodavanjem tog člana dolazi do povećanja odstupanja modela prema dobivenim podacima. Time je potvrđeno da je utjecaj pomaka profila beznačajan na ostvareni broj ciklusa u ispitnom području ostalih parametara. To ne mora značiti da utjecaj pomaka profila u drugom rasponu faktora opterećenja i vlage nema utjecaj na ostvareni broj ciklusa. Osim linearnih članova koji imaju najveći utjecaj na ostvareni broj ciklusa interakcijom članova AC može se značajnije utjecati na ostvareni broj ciklusa. Članovi višeg reda A^2 i C^2 nemaju tako visoki postotak utjecaja na model te su uključeni u model u svrhu poštovanja hijerarhije te boljeg opisivanja podataka.

Tablica 5.10 Analiza varijance rezultata ostvarenog broja ciklusa

Izvor varijabilnosti	Suma kvadrata odstupanja SS	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja S^2	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0 P
Model	$1,88 \cdot 10^{13}$	5	$3,76 \cdot 10^{12}$	22,04	< 0,0001
Faktor A	$7,95 \cdot 10^{12}$	1	$7,95 \cdot 10^{12}$	46,55	< 0,0001
Faktor C	$5,63 \cdot 10^{12}$	1	$5,63 \cdot 10^{12}$	32,97	< 0,0001
AC	$4,06 \cdot 10^{12}$	1	$4,06 \cdot 10^{12}$	23,78	0,0004
A^2	$4,29 \cdot 10^{11}$	1	$4,29 \cdot 10^{11}$	2,51	0,1392
C^2	$1,17E \cdot 10^{12}$	1	$1,17 \cdot 10^{12}$	6,86	0,0225
Ostatak	$2,05 \cdot 10^{12}$	12	$1,71 \cdot 10^{11}$		
Odstupanje od modela (e. <i>Lack of fit</i>)	$1,01 \cdot 10^{12}$	8	$1,26 \cdot 10^{11}$	0,48	0,8219
Čista pogreška	$1,04 \cdot 10^{12}$	4	$2,60 \cdot 10^{11}$		
Ukupno	$2,09 \cdot 10^{13}$	17			

Ukupna pogreška modela odstupanja za ostvareni broj ciklusa iznosi 9,82% dok je udjel varijabilnosti modela za ostvareni broj ciklusa interpretiran preko koeficijenta determinacije koji za ovaj slučaj iznosi $R^2 = 0,9018$, što govori da je 90,18 % promjene broja ciklusa objašnjivo s odabrana tri faktora. Iznos prilagođenog koeficijenta determinacije $R^2_{\text{pril}} = 0,8609$ govori da je 86,09 % modela objašnjivo odabranim faktorima, dok je predviđajući koeficijent determinacije $R^2_{\text{pred}} = 0,7921$ iznos od 79,21% dobivenih podataka, opisanih eksperimentalnim modelom, moguće opisati dobivenim predviđajućim modelom za određivanje broja ciklusa tijekom radnog vijeka. Povećavanja pouzdanosti modela moguće je postići jedino povećavanjem broja pokusa.

Uspoređivanjem razlike masa te ostvarenog broja ciklusa vidljivo je da na gubitak mase jako utječe pomak profila dok na broj ciklusa više dolaze do izražaja opterećenje i količina vode u materijalu. Uspoređivanjem rezultata tablica 5.9 i 5.10 moglo bi se zaključiti da gubitak mase, koji se često povezuje s povećanim trošenjem, nije glavni uzrok prestanka rada koji utječe na ostvareni broj ciklusa u predloženom rasponu opterećenja.

5.5.1 Predloženi model očekivanog broja ciklusa za zupčanike od PA 6

Za raspon opterećenja u granicama od 20 Nm do 30 Nm te mijenjanje vode u materijalu uz različite pomake prema odabranom planu pokusa te rezultatima iz Tablice 5.8, dobiven je model koji opisuje podatke prema prethodnom poglavlju 5.5 s pomoću jednadžbe 5.8.

$$N = C_0 - C_1 \cdot A + C_2 \cdot C - C_3 \cdot A \cdot C + C_4 \cdot A^2 - C_5 \cdot C^2 \quad (5.8)$$

pri čemu je

N - očekivani broj ciklusa

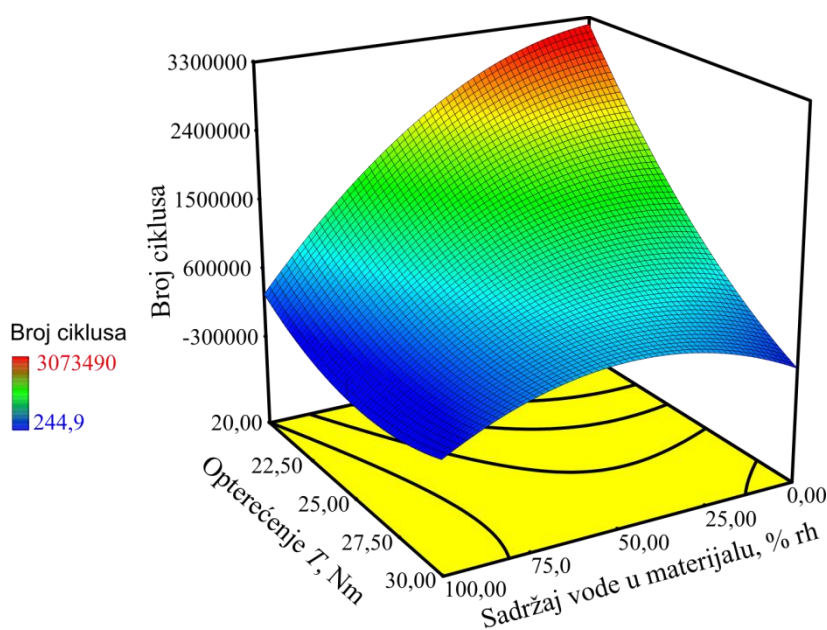
A - opterećenje T , Nm

C - stanje materijala, % rh

Konstante $C_0 \dots C_5$ prikazane su u Tablici 5.11.

Tablica 5.11 Konstante modela ostvarenog broja ciklusa

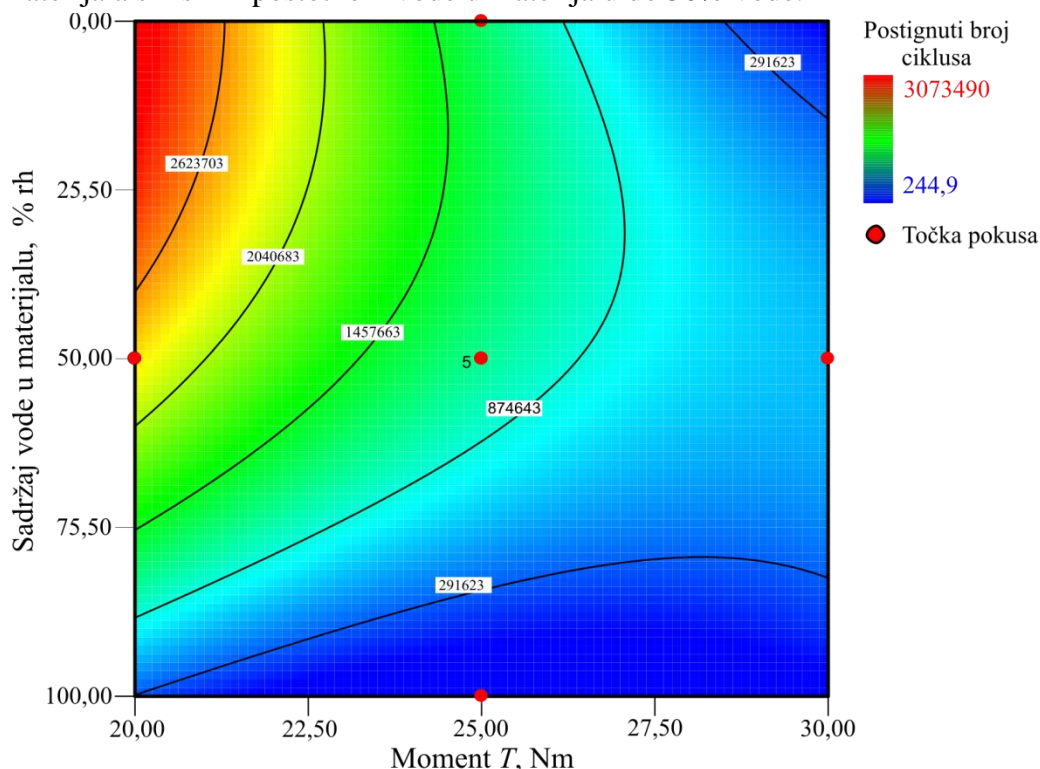
Konstanta	Vrijednost
C_0	$1,09508 \cdot 10^{11}$
C_1	89158600000
C_2	75038600000
C_3	71244300000
C_4	37176900000
C_5	61454500000



Slika 5.26 Prostorni prikaz rezultata pokusa za ostvoreni broj ciklusa

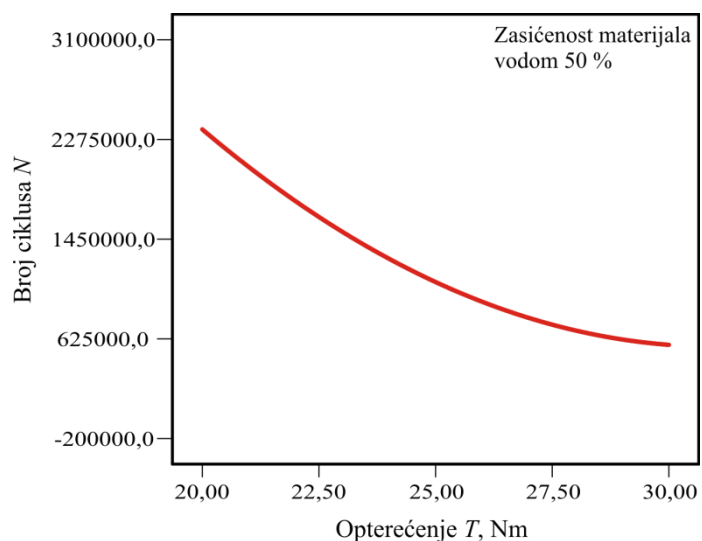
Na Slici 5.26 prikazana je ovisnost opterećenja i vlage na ostvoreni broj ciklusa. Iz slike je moguće vidjeti trend porasta postignutih ciklusa smanjivanjem opterećenja u sadržaja vode u materijalu. Ispitni zupčanici s malim postotkom vlage te kod opterećenja od $T = 20$ Nm mogu izdržati minimalno $3 \cdot 10^6$ ciklusa, što prema ISO 6336-3 ulazi u područje trajne čvrstoće ($N_L > 3 \cdot 10^6$). Na Slici 5.27 dan je prikaz ostvarenih brojeva ciklusa prema opterećenju i sadržaju vode u materijalu, gdje je moguće primijetiti postojanje velike razlike u broju ciklusa variranjem količine vode u materijalu nasuprot materijala s niskim sadržajem vode. Moguće je izvesti zaključak da kod

zupčanika s velikim sadržajem vode, višim od 75% do ukupne zasićenosti, ostvariv je manji broj ciklusa nasuprot materijala s nižim postotkom zasićenosti. To iziskuje dodatna ispitivanja kako bi se odredile granice opteretivosti za zupčanike s visokim postotkom vode, koje su osjetno manje nasuprot materijala s niskim postotkom vode u materijalu do 50% vode.

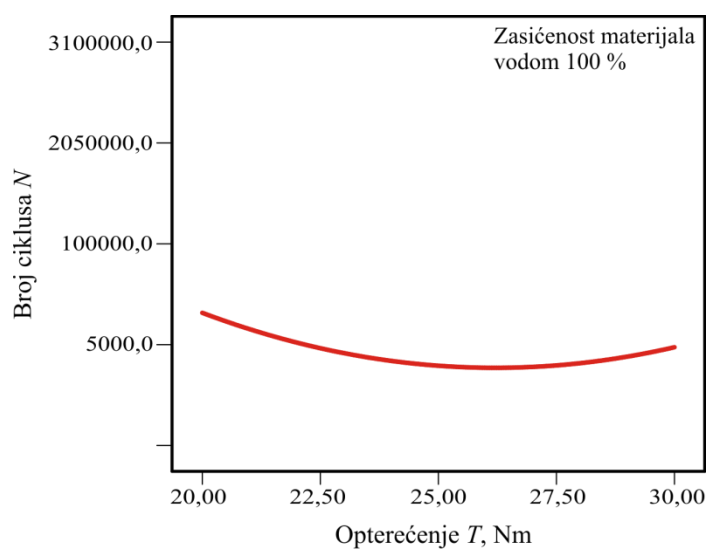


Slika 5.27 Grafički prikaz rezultata za ostvareni broj ciklusa kod pomaka profila J_1

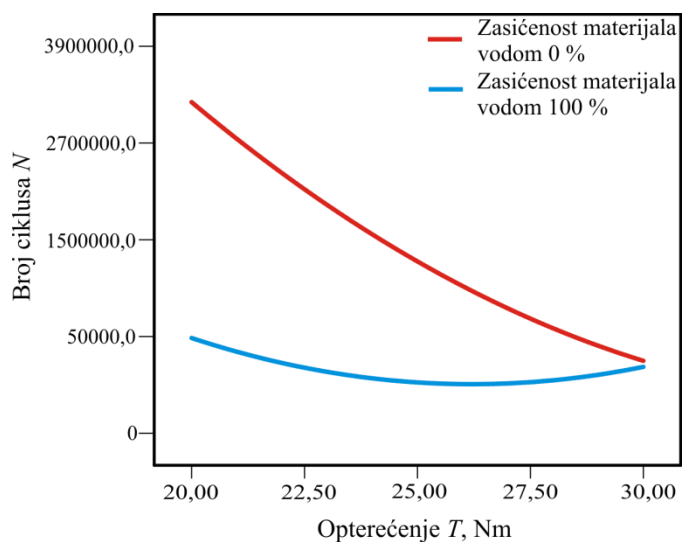
Na Slikama 5.28, 5.29 i 5.30 prikazani su dijagrami ovisnosti ispitnog opterećenja o očekivanom broju ciklusa za tri stanja materijala. Prema dijagramu na Slici 5.28 za stanje materijala od prosječno 50% zasićenosti materijala koji je i najčešći slučaj uporabe najmanjeg ispitnog opterećenja od $T = 20$ Nm, moguće je dostići područje trajne čvrstoće ($N_L > 3 \cdot 10^6$). Povećavanjem opterećenja dolazi do pada očekivanog broja ciklusa, odnosno tijekom rada primijećeno je da povećanjem opterećenja dolazi do taljenja materijala. Daljnjim povećanjem zasićenosti vodom materijala prema dijagramu na Slici 5.29, dolazi do naglog smanjenja ostvarenog broja ciklusa. Mali broj ostvarenih ciklusa za ispitivana opterećenja navodi da predviđeni raspon opterećenja prikazan na dijagramima, nema nekog posebnog značenja za primjenu, ali nam govori da su granice opteretivosti ovisne o sadržaju vode u materijalu te rastu sa smanjenjem zasićenosti materijala. To je moguće prikazati dijagramom na Slici 5.30, gdje je prikazana krivulja očekivanog broja ciklusa kod zupčanika sa 100% rh i sa smanjenim udjelom vode u materijalu. Vidljivo je da povećanjem opterećenja dolazi do spajanja krivulja bez obzira na stanje materijala, što je moguće objasniti postizanjem opterećenja visoko iznad granice nosivosti, a utječe na ubrzano smanjenje broja ciklusa. Jasno su vidljive razlike između zasićenog i nezasićenog materijala na donjim granicama opterećenja te njihovo spajanje povećavanjem opterećenja. Ako se izuzme dio opterećenja koji dovodi do naglog prestanka rada, moguće je izuzeti iskoristivo područje od 25 Nm za raspon zasićenosti od 0 do 75 % rh.



Slika 5.28 Utjecaj opterećenja na ostvoreni broj ciklusa kod zasićenosti materijala 50%



Slika 5.29 Utjecaj opterećenja na ostvoreni broj ciklusa kod zasićenosti materijala 100%



Slika 5.30 Utjecaj opterećenja na ostvoreni broj ciklusa kod različitih zasićenosti materijala

5.6 Utjecaj radnih stanja na srednju temperaturu boka zuba polimernih zupčanika

Temperatura nastala zbog trenja te površinskog pritiska, prema [13, 42], sastoji se prema izrazu 5.9 od temperature okoline (T_{ambi}), temperature tijela zupčanika (T_{bulk}) i trenutne temperature dodira boka zuba (T_{flash}). Temperatura okoline obično se računa kao konstanta, a tijekom provedbe ispitivanja nalazi se u granicama od 20°C do 25°C. Temperatura tijela zupčanika nije mjerena, te ju je moguće dobiti poznavanjem temperature okoline iz izraza 5.10 prema *Hachmann* i *Strickle* metodi [56], primijenjenoj u normi BS 6168. Točnu temperaturu boka vrlo je teško mjeriti na polimernim zupčanicima te je prema poglavlju 4.2, mjerenje provedeno s pomoću bezkontaktnog termometra, koji daje srednje vrijednosti temperature boka, što približno opisuje temperaturu u zahvatu. Poznavanjem tih triju temperatura moguće se približiti maksimalnoj temperaturi zupčanika koju je potrebno poznavati za točnije određivanje dopuštenih proračunskih vrijednosti za pravilno dimenzioniranje polimernih zupčanika.

$$T_{\text{surface}} = T_{\text{flash}} + T_{\text{bulk}} + T_{\text{ambi}} \quad (5.9)$$

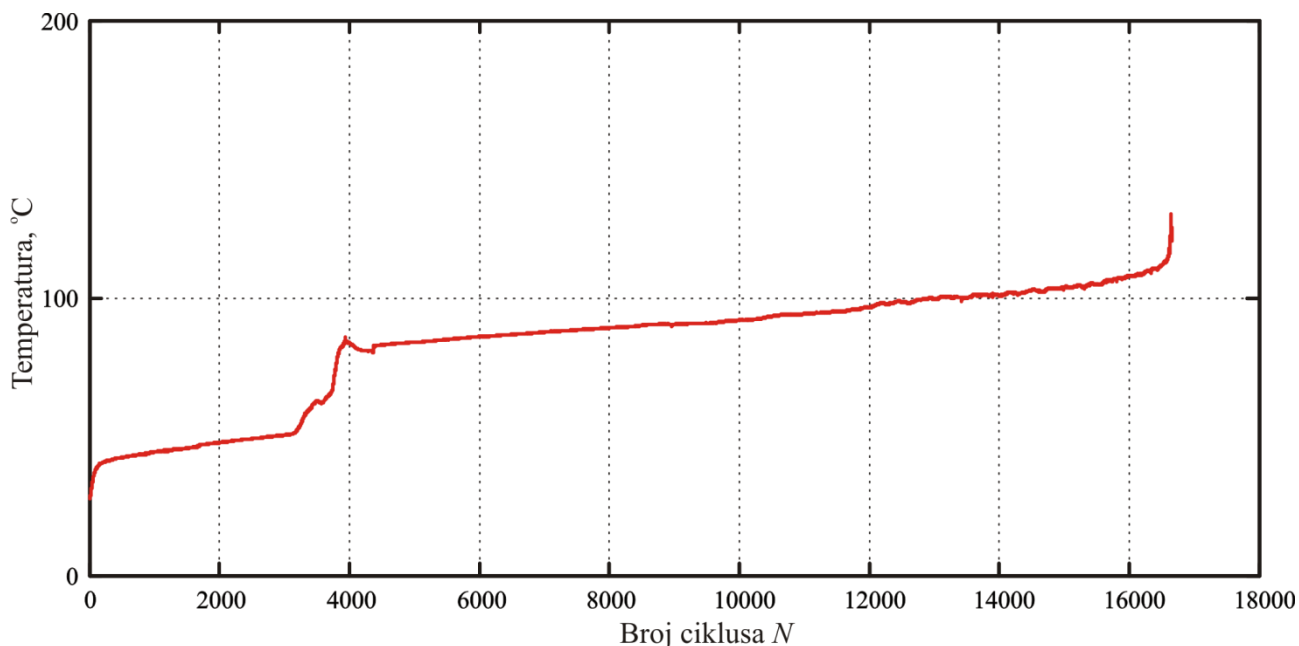
$$T_{\text{bulk}} = T_{\text{ambi}} + \frac{136 \cdot P_T \cdot \mu \cdot (1 + \mu)}{(z_g + 5)} \left[\frac{17100 \cdot K_a}{b \cdot z_p \cdot (v \cdot m)^{K_M}} + \frac{7,3 \cdot K_b}{A_k} \right] \quad (5.10)$$

Gdje je :

- P_T - prenesena snaga, W
- μ - faktor trenja
- z_g - broj zubi gonjenog zupčanika
- z_p - broj zubi pogonskog zupčanika
- v - brzina na temeljnoj kružnici ($v = \pi \cdot d \cdot n / 60$), m/s
- K_a - empirički faktor podmazivanja ($K_a = 2,4$ za slučaj bez podmazivanja za PA/PA)
- K_b - empirički faktor kućišta ($K_b = 0,172$ za zatvoreno kućište)
- K_M - empirički faktor materijala ($K_a = 0,75$ za PA 6 i PA 66)
- A_k - površina kućišta, m²

Temperatura boka zuba u ukupnoj temperaturi ima najviši utjecaj na ukupnu temperaturu i općenito na trošenje zupčanika, odnosno procese koji se javljaju kod dodira dvaju bokova zuba zupčanika. Tijekom ispitivanja, ta temperatura izravno utječe na proces zaribavanja te lokalnom topljenje materijala prilikom rada zupčanika. Na Slici 5.31 prikazano je mjerenje temperature boka kroz cijeli radni vijek zupčanika za slučaj toplinskog zaribavanja. Dostizanjem kritične temperature tijekom povećanja broja ciklusa dolazi prvo do povećanog trošenja koje prelazi u lokalno taljenje materijala, što se daljnjim radom očituje kao posljedica odvajanja većih komada materijala. Dolazi do gubitka evolventnog profila zuba te se komadići rastaljenog polimera nakupljaju se u području korijena zuba pa često dolazi do zaglavljivanja i prestanka rada zupčanog para. Poglavljem 5.8 opisani su ostali tipovi zadovoljavanja radnog vijeka zupčanika dobiveni tijekom ispitivanja, te utjecaj temperature na ostale mjerne veličine. Analiziranjem dijagrama moguće je primijetiti nagli skok u temperaturi, pri 4000 ostvarenih ciklusa od početka kontinuiranog rada. Tijekom rada za slučaj termalnog zaribavanja polimernih zupčanika, zamijećeno je povećanje torzijskih vibracija, veće rasipanje momenta te povećanje otpora u cijelom sustavu. Na zupčanicima je tijekom rada zamijećena pojava sitnih odbačenih čestica koje su se odlomile s bokova zuba u zahvatu. Takvo

prijelazno stanje traje relativno kratko te dolazi do sniženja temperature u zahvatu, ali ne na početnu vrijednost prije povišenja temperature, nego na prosječnu vrijednost od $86,19^{\circ}\text{C}$. Prosječno povišenje s obzirom na početne vrijednosti je povišenje temperature od prosječno $32,06^{\circ}\text{C}$. Uz pad temperature dolazi i do smanjenja otpora u sustavu. Nakon opisanog poremećaja dolazi kratko razdoblje stabilizacije te područje kontinuiranog rasta temperature u zahvatu do područja kritičnih temperatura, nakon čega slijedi vrlo brzi rast temperature što dovodi do toplinskog zaribavanja prema Slici 5.32.



Slika 5.31 Promjena temperature tijekom radnog vijeka rada kod toplinskog zaribavanja, $T = 25 \text{ Nm}$, $n = 1000 \text{ min}^{-1}$



Slika 5.32 Toplinsko zaribavanje polimernih zupčanika gonjenog i pogonskog zupčanika, bok zuba nakon zadovoljavanja radnog uvjeta

Polimerni zupčanici koji tijekom radnog vijeka nisu došli do toplinskog zaribavanja, odnosno prema zadanim faktorima zadovoljili su uvjet od ostvarenih minimalno $3 \cdot 10^6$ ciklusa, što prema ISO 6336-3 ulazi u područje trajne čvrstoće ($N_L > 3 \cdot 10^6$). Iznosi su očitani iz dijagrama u zadnja tri

mjerenja od po 5 h rada prije završetka rada svakog ciklusa. Dani rezultati prikazani su u Tablici 5.12, gdje je moguće vidjeti da prosječna temperatura koja se javlja kod zupčanika za broj okretaja manjeg zupčanika $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ te opterećenja ispod granica opteretivosti za danu brzinu iznose, $86,16^\circ\text{C}$. Analiziranjem podataka prema pomaku profila moguće je vidjeti da korekcijama pomaka profila postoji osnova za daljnja ispitivanja koja bi potvrdila ili opovrgla pretpostavku o povišenju temperature bokova u slučaju maksimalne podrezanosti manjeg zupčanika (faktor J_2) u usporedbi optimalne podrezanosti, odnosno minimalnog klizanja na manjem zupčaniku (faktor J_3) za područje ispod granice opteretivosti.

Tablica 5.12 Srednje temperature zahvata za opterećenje $T = 20 \text{ Nm}$ tijekom rada zupčanika

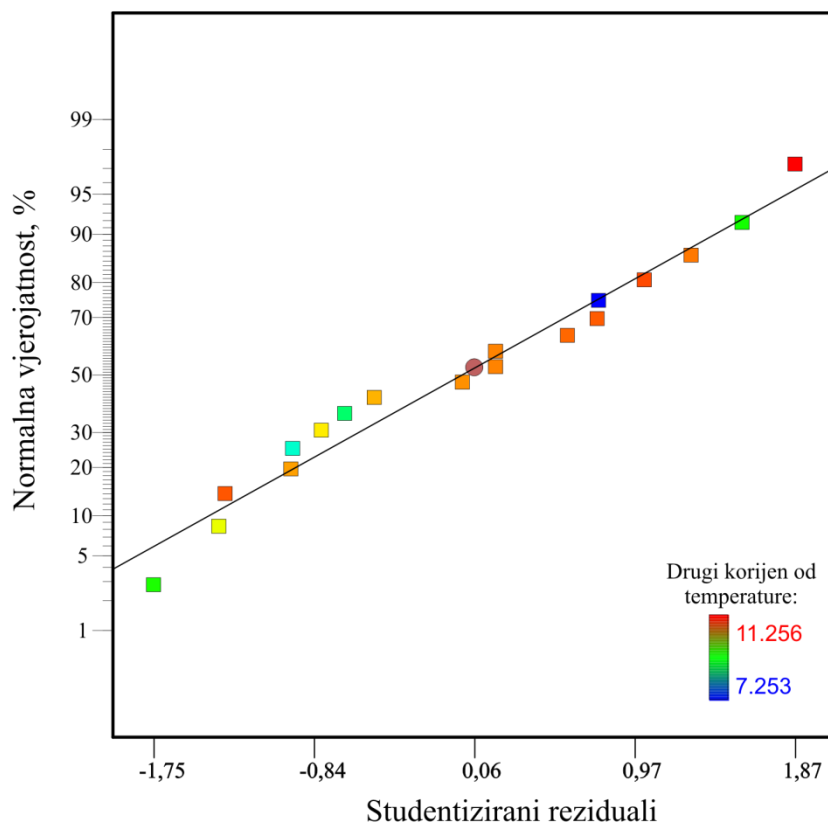
Oznaka uzorka	Mjerenje 1 [°C]	Mjerenje 2 [°C]	Mjerenje 3 [°C]	Srednja vrijednost [°C]
3003	81,7	82,5	81,4	81,87
2003	90,6	86,7	89,4	88,90
1005	88,3	88,4	86,4	87,70
				86,16

U Tablici 5.13 prikazani su rezultati srednjih temperatura bokova, postignutih tijekom zadovoljavanja radnih uvjeta za sve ispitne parove prema varijacijama ispitnih faktora.

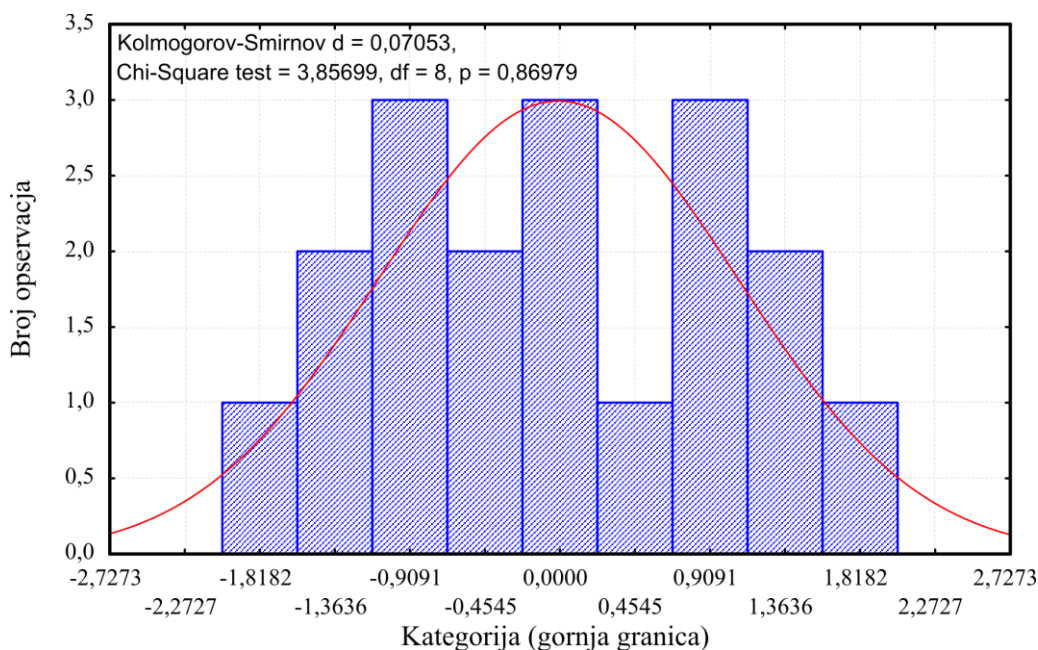
Tablica 5.13 Rezultati srednjih temperatura boka zuba i promjene buke tijekom rada

	Faktor A: Opterećenje T [Nm]	Faktor B: Pomak profila J_i [mm]	Faktor C: Stanje materijala	IR -srednja temperatura zahvata [°C]	Razlika buke [dB]	Vrsta kriterija radnog vijeka
Oznaka uzorka	Razina	Razina	Razina			
2003	-1	1	1	87,08	-0,668	RU2
1011	0	0	0	115,4	-1,193	RU1
3004	0	-1	0	114,3	-0,452	RU3
3005	1	-1	1	106,7	3,300	RU3
2001	1	1	-1	52,6	-1,225	RU3
1012	0	0	0	111,4	-1,400	RU3
2005	1	1	1	116,4	1,785	RU3
2004	0	1	0	115,4	2,230	RU3
1003	0	0	-1	103,5	-1,600	RU3
1008	0	0	0	117,8	1,980	RU3
1010	0	0	1	119,3	2,039	RU3
1004	1	0	0	71,52	0,000	RU3
3002	-1	-1	-1	113	-3,525	RU3
1006	0	0	0	120,4	-1,767	RU1
3003	-1	-1	1	78,13	-1,527	RU2
1009	0	0	0	118,8	0,890	RU3
3001	1	-1	-1	87,57	0,000	RU3
1005	-1	0	0	87,64	1,226	RU2
1007	0	0	0	90,86	3,611	RU2
2002	-1	1	-1	126,7	-4,177	RU3

Papir vrijednosti ostataka, većinom je raspodijeljen prema normalnoj razdiobi (Slika 5.33), uz provedbu dva statistička testa Kolmogorov - Smirnov test (K-S test) te provjeru varijance χ^2 - pomoću histograma. Na slici 5.34 dana je potvrda rasipanja ostataka prema normalnoj razdiobi. To potvrđuje da je moguće izvesti kvalitativne zaključke o signifikantnosti određenih faktora na rezultate pokusa, odnosno da je statistički model valjan za opisivanje podataka.



Slika 5.33 Papir vjerojatnosti ostataka po normalnoj razdiobi predloženog modela za srednju temperaturu boka zuba



Slika 5.34 Kolmogorov – Smirnov i χ^2 test provjere normalnosti ostataka modela za srednju temperaturu boka zuba

Analizom varijance, prema Tablici 5.14, prikazan je utjecaj pojedinih faktora i njihovih interakcija na model. Vidljiv je signifikantan značaj faktora opterećenja na ukupnu temperaturu u zahvatu posebice člana višeg reda (A^2), dok linearni član prvog reda ima nešto manji utjecaj na jednadžbu modela, ali još visoko nasuprot drugim linearnim članovima uključenim u model. Zanimljivo je primijetiti i da na ukupnu temperaturu u danom rasponu postoji utjecaj člana koji se odnosi na postotak vlage (faktor C), dok utjecaj člana višeg reda (C^2) slabije utječe na model, ali radi boljeg opisivanja zadržan je u jednadžbi modela. Interakcija opterećenja i vlage u materijalu čini signifikantan faktor za opisivanje modela. Ostali članovi nemaju signifikantan utjecaj na iznos temperature. Pretpostavka je bila da u danom području postoji utjecaj pomaka profila na srednju temperaturu boka, ali zbog relativno visokog opterećenja iznad i oko granice opteretivosti prema zadanom rasponu, nije zamijećen signifikantan utjecaj. Ostaje za istražiti postoji li utjecaj u području ispod granice opteretivosti.

Tablica 5.14 Analiza varijance rezultata srednjih temperatura boka zuba

Izvor varijabilnosti	Suma kvadrata odstupanja SS	Stupnjevi. slobode	Srednji kvadrat odstupanja S^2	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0 P
Model	18,62	5	3,72	43,20	< 0,0001
Faktor A	2,52	1	2,52	29,19	0,0002
Faktor C	1,20	1	1,20	13,87	0,0029
AC	11,13	1	11,13	129,17	< 0,0001
A^2	6,76	1	6,76	78,44	< 0,0001
C^2	0,078	1	0,078	0,90	0,3617
Ostatak	1,03	12	0,086		
Odstupanje od modela (e. <i>Lack of fit</i>)	0,93	8	0,12	4,38	0,0851
Čista pogreška	0,11	4	0,027		
Ukupno	19,65	17			

Za izmjerene temperature bokova zupčanika pogreška odstupanja modela iznosi 5,26 % uz udjel varijabilnosti modela koji, je određen koeficijentom determinacije i iznosi $R^2 = 0,9474$ uz 94,74 %. Iznos prilagođenog koeficijenta determinacije $R^2_{pri} = 0,9254$ govori nam da je 92,54 % modela objašnjivo s odabranim faktorima, dok je predviđajući koeficijent determinacije $R^2_{pred} = 0,8433$ iznos od 84,33% dobivenih podataka, opisanih eksperimentalnim modelom, moguće opisati dobivenim predviđajućim modelom za određivanje srednje temperature bokova prije prekida rada polimernog zupčanika od ekstrudiranog poliamida (PA 6). S obzirom na relativno mali broj ispitanih zupčanika te zahtjevnost procesa, predviđajući koeficijenti dobro opisuju podatke, a možebitno povećanje pouzdanosti moguće je ostvariti dodatnim ispitivanjima.

5.6.1 Predloženi model određivanja srednje temperature zahvata boka zuba

Podatke u Tablici 5.13, analiziranjem prema ispitnim faktorima uz prethodno opisane vjerojatnosti, moguće je opisati sljedećim modelom prema jednadžbi 5.11, uz koeficijente prema Tablici 5.15.

$$t_{sflash} = (C_0 - C_1 \cdot A + C_2 \cdot C - C_3 \cdot A \cdot C + C_4 \cdot A^2 - C_5 \cdot C^2)^2 \quad (5.11)$$

pri čemu je

t_{sflash} - srednja temperatura boka zuba

A - opterećenje T , Nm

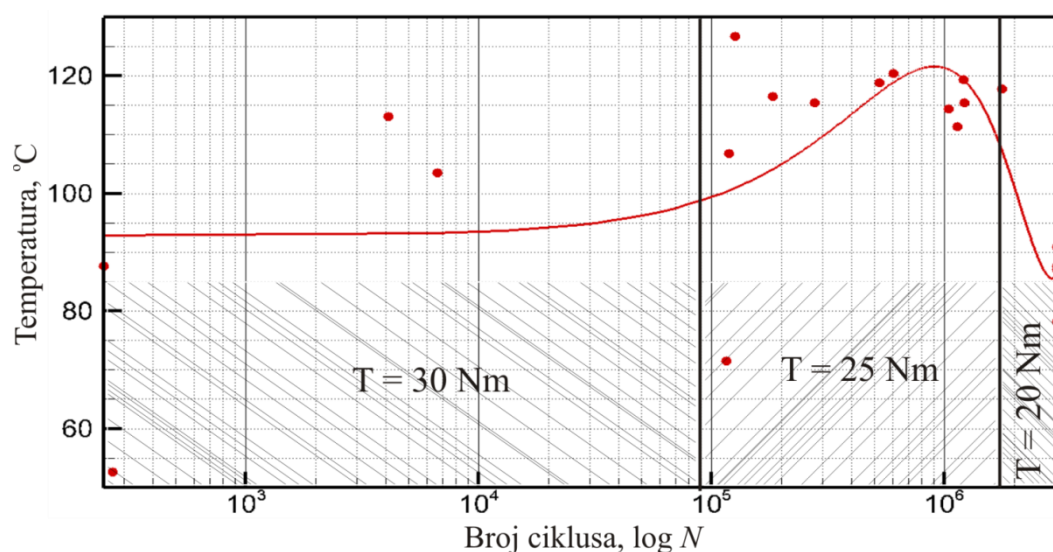
C - stanje materijala, % rh

Konstante $C_0 \dots C_5$ prikazane u Tablici 5.15.

Tablica 5.15 Konstante modela srednje temperature zahvata boka zuba

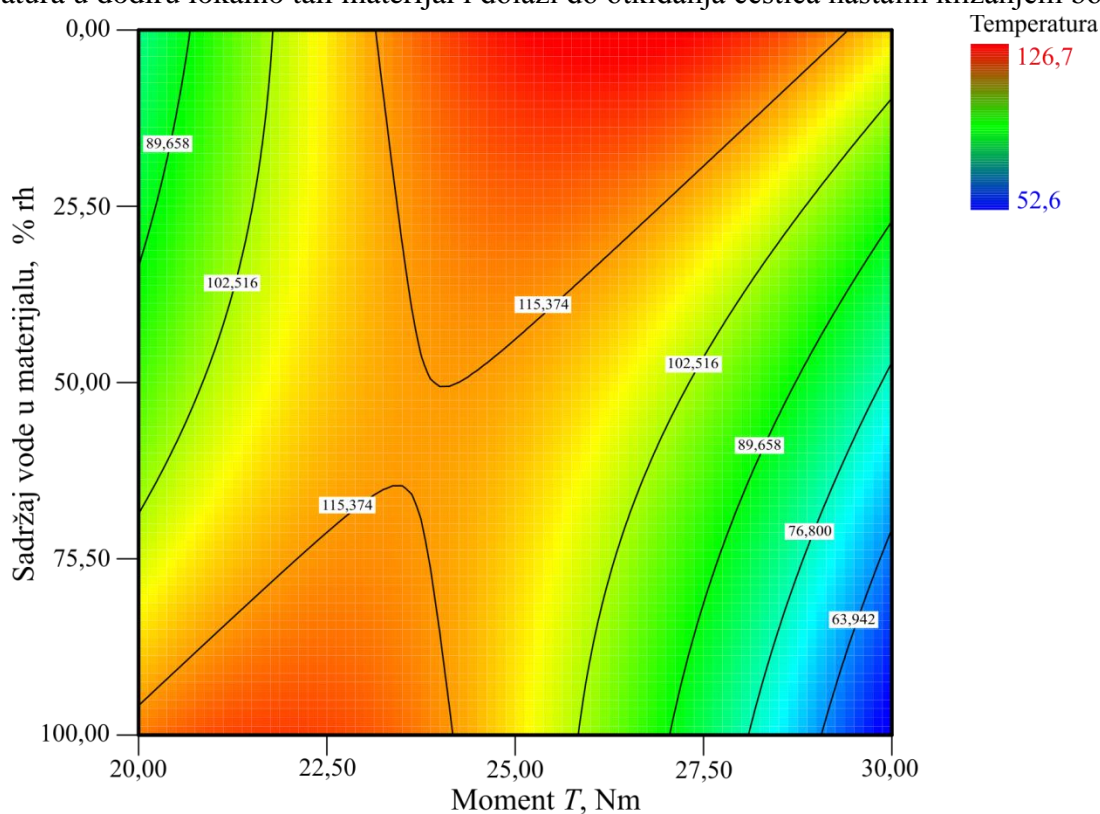
Konstanta	Vrijednost
C_0	10,69
C_1	0,54
C_2	0,37
C_3	1,30
C_4	1,48
C_5	0,15848

Usporedbom izraza u jednadžbama 5.8 i 5.11, vidljiva je ista struktura modela s razlikom u koeficijentima te kvadratom u izrazu za srednju temperaturu boka. To ukazuje na usporedivost temperature i ostvareni broj ciklusa, odnosno postoji povezanost ostvarene temperature u zahvatu prema ostvarenom broju ciklusa zupčanika u radu preko istih ulaznih varijabli. Na Slici 5.35 moguće je vidjeti ostvarene srednje temperature boka za ostvareni broj ciklusa. Prosječne temperature između 80°C i 90°C javile su se kod ispitnih tijela koja su ostvarila $3 \cdot 10^6$ ciklusa kod opterećenja od 20 Nm, dok se prosječne temperature u rasponu oko 120 °C javljaju kod ispitnih tijela koja su toplinski zaribali, s ostvarenih $2 \cdot 10^6$ ciklusa pa do $1,1 \cdot 10^6$ ciklusa i 25 Nm. Vrlo kratki ciklusi javljaju se sa srednjim temperaturama zbog kratkog rada i nemogućnosti razvijanja temperature tijekom rada, odnosno utjecajem previsokog opterećenja i previsokih kontaktnih pritisaka.



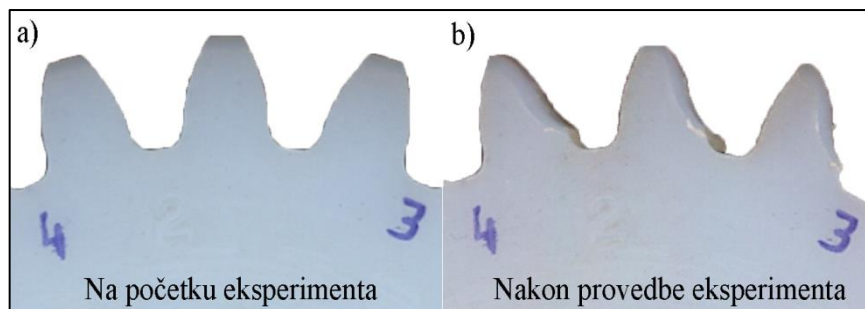
Slika 5.35 Srednja temperatura boka prema ostvarenom broju ciklusa za stalni pogon za opterećenja u rasponu od 20 Nm do 30 Nm

Grafički prikaz jednadžbe 5.11 dan je na Slici 5.36, gdje je moguće vidjeti raspored srednjih temperatura boka zuba u ovisnosti o opterećenju i sadržaju vode u materijalu. Moguće je primijetiti da se najviše temperature očekuju u području opterećenja od 20 Nm do 25 Nm s kombinacijama udjela vode u materijalu od 100% rh zasićenosti do 65% rh. Područje ispitnog opterećenja oko 20 Nm s udjelom vode u materijalu od 0 do 65 % rh razvijaju tijekom rada nešto niže temperature na boku zuba, posebice zbog manjeg opterećenja, a na tom području nije zabilježeno temperaturno zaribavanje, odnosno ispitni zupčanci mogu doseći do $3 \cdot 10^6$ ciklusa. Model pokazuje da područje opterećenja iznad 25 Nm u rasponu vode u materijalu od 15% rh do 100% rh tijekom rada daje isto tako niže temperature u usporedbi s rasponom do 25 Nm. Uzrok tome je najvjerojatnije u previsokom opterećenju, zupčanci izdržavaju mali broj ciklusa, javlja se toplinsko zaribavanje i pri nižim temperaturama u slučaju visokog postotka vode u materijalu. Dolazi do pada tvrdoće i modula rastezljivosti. Uspoređujući temperature s dijagramima na Slici 5.35 i Tablicama 5.8 i 5.13, moguće je uočiti da se najviše temperature javljaju kod ispitnih tijela koja su temperaturno zaribala u rasponu do $2 \cdot 10^6$ ciklusa. Pretpostavka je da je razlog tome trošenje materijala, odnosno da temperatura u dodiru lokalno tali materijal i dolazi do otkidanja čestica nastalih klizanjem bokova.



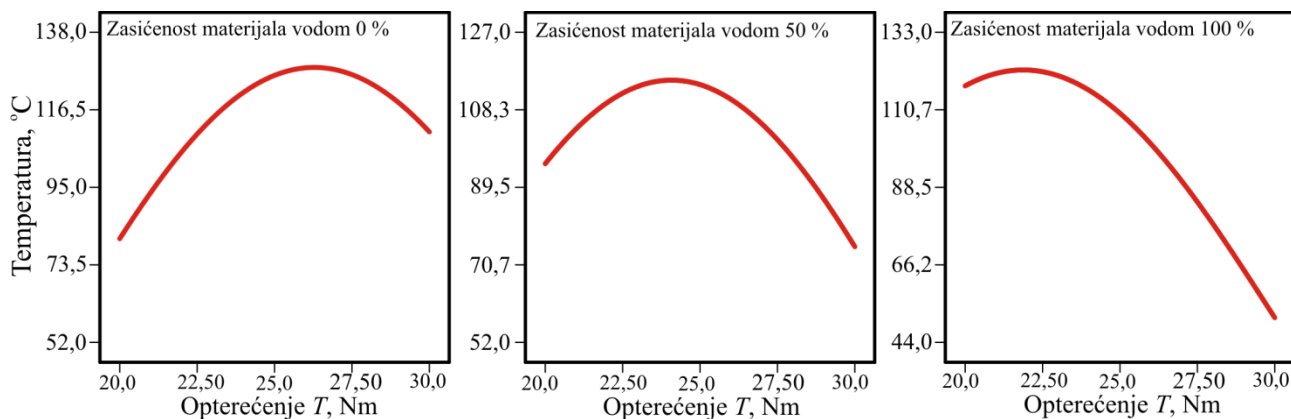
Slika 5.36 Grafički prikaz modela maksimalnih srednjih temperatura boka zuba

Tijekom provedbe ispitivanja uočeno je odvajanje čestica materijala različitih veličina i oblika. U početku dolazi do odvajanja sitnijih čestica dok s povišenjem temperature dolazi i do povećanja veličine čestica. Ispitna tijela koji su postizala najviše temperature vidljivo su bila u području intenzivnog trošenja. Na Slici 5.37 prikazan je zupčanik, gdje je vidljivo intenzivno trošenje nastalo prije temperaturnog zaribavanja.

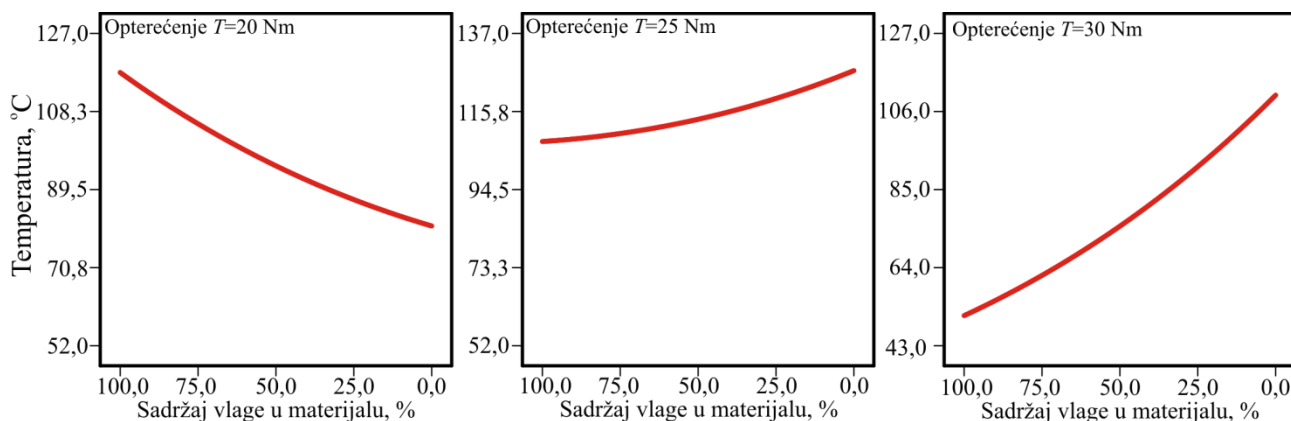


Slika 5.37 Intenzivno trošenje zuba pri $T = 25 \text{ Nm}$, J_1 : a) prije, b) nakon ostvarenog radnog vijeka

Na Slici 5.38 dani su prikazi srednjih temperatura bokova zuba u ovisnosti o opterećenju za tri karakteristična stanja materijala. Tijekom rada polimernih zupčanika nedvojbeno dolazi do promjene postotka vlage u zraku. Takve promjene duljim izlaganjem PA 6 zupčanika utječu na postotak vode u materijalu, što se očituje i na ostvarenu srednju temperaturu pri određenom opterećenju. Na Slici 5.39 prikazana su tri karakteristična stanja zasićenosti PA 6 zupčanika srednje temperature boka zuba u zahvatu.



Slika 5.38 Očekivane srednje temperature boka zuba za ispitni raspon opterećenja kod karakterističnih zasićenost poliamida PA 6

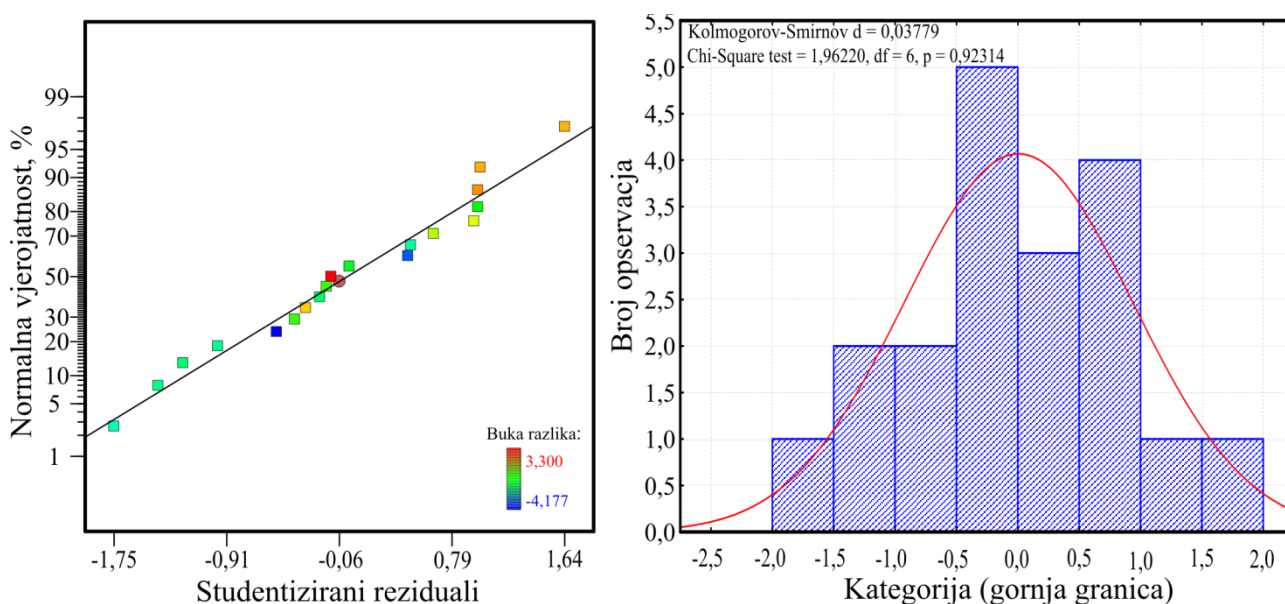


Slika 5.39 Očekivane srednje temperature boka zuba za različitu zasićenost poliamida PA 6 kod 20, 25 i 30 Nm

5.7 Utjecaj radnih stanja na povećanje buke i mirnoće prijenosa

Polimerni zupčanici tijekom rada, zbog opetovanog ulaženja i izlaženja zubi iz zahvata, razvijaju zvuk koji se manifestira kao buka zbog titranja zubi te drugih pojava tijekom zahvata. Na razvoj buke kod metalnih zupčanika, prema [53], zabilježen je utjecaj promjene modula, pomaka profila te ostalih geometrijskih karakteristika prijenosnika. U slučaju polimernih zupčanika zabilježena su bolja prigušujuća svojstva u usporedbi s metalnim zupčanicima (poglavlje 1.2). U Tablici 5.13 dani su iznosi promjene buke tijekom rada za zadane radne uvjete. Mjerenja su provedena prema normi AGMA 299.02 koja dopušta mjerenje na nestandardnoj udaljenosti za usporedbu zupčanih parova. Rezultati u dobiveni oduzimanjem iznosa buke na sredini životnog vijeka od iznosa buke na početku rada. Pozitivni iznosi upućuju na povećanje buke tijekom rada dok negativni iznos znači smanjenje buke u odnosu na početka rada.

Prikazom papira vrijednosti ostataka koji je većinom raspodijeljen prema normalnoj razdiobi (Slika 5.40) može se primijetiti veće rasipanje vrijednosti, a uzrok tome najvjerojatnije je niža klasa uređaja te utjecaj okoline i ostalih elemenata u ispitnom uređaju. Provjerom statističkih testova, Kolmogorov - Smirnov test (K-S test) i provjerom varijance χ^2 , prikazano je odstupanje reziduala prema normalnoj razdiobi (Slika 5.40).



Slika 5.40 Vjerodostojnost ostataka i statistički testovi: a) Papir vjerojatnosti ostataka modela te Kolmogorov - Smirnov test (K-S test) i provjera varijance χ^2 prema normalnoj razdiobi predloženog modela

U Tablici 5.16 prikazani su rezultati analize varijance koji pokazuju utjecajnost sva tri faktora na iznos buke. Iznos P prikazuje utjecaj faktora na model, i moguće je primijetiti da ni jedan faktor nema signifikantno značenje ($P < 0,01$ %). Uzrok tome može biti u neodgovarajućim faktorima ili točnosti mjernih rezultata. Pokazalo se da je najveći utjecaj vode u materijalu (faktor C) zajedno s interakcijom članova višeg reda AB^2 (interakcija opterećenja i pomaka profila). Ostali članovi nemaju značajniji utjecaj na model. Uspoređujući metalne zupčanike, kod kojih je opterećenje i pomak profila poznato da utječu na razvoj buke uz ostale parametre [53], kod zupčanika od PA 6 potvrđen je još i utjecaj faktora C (postotak zasićenosti) i to kao jednog od utjecajnijih faktora. Razlog tome mogao bi se pronaći u samom materijalu te svojstvu poliamida jer su skloni apsorpciji vode (poglavlje 2.2.1), što dovodi do promjena mehaničkih svojstava materijala (poglavlje 2.2.3)

koja utječu na razvoj buke. Utjecaj vode u materijalu nije bio neočekivani faktor kad se promatraju polimerni zupčanici, posebice stoga što, povećanjem zasićenosti poliamida vodom, dolazi do sniženja tvrdoće i povećanja žilavosti materijala [31] čime zub koji ulazi u zahvat mijenja svojstva.

Tablica 5.16 Analiza varijance rezultata promjene buke tijekom radnog vijeka zupčanika

Izvor varijabilnosti	Suma kvadrata odstupanja SS	Stupnjevi slobode	Srednji kvadrat odstupanja S^2	Varijabla F	Rizik odbacivanja hipoteze H_0 P
Model	55,54	6	6	6,76	0,0026
Faktor B	3,60	1	1	2,63	0,1310
Faktor C	23,89	1	1	17,45	0,0013
AB	1,09	1	1	0,79	0,3906
C^2	2,51	1	1	1,83	0,2006
A^2B	4,40	1	1	3,21	0,0983
AB^2	23,66	1	1	17,28	0,0013
Ostatak	16,43	12	12		
Odstupanje od modela (e. <i>Lack of fit</i>)	5,65	8	8	0,26	0,9492
Čista pogreška	10,77	4	4		
Ukupno	71,96	18			

Varijabilnost modela za razliku buke tijekom rada polimernih zupčanika iznosi 22,82% prema koeficijentu determinacije $R^2 = 0,7718$ uz 77,18% promjena razlike buke, objašnjivih preko odabranih faktora. Prilagođeni koeficijent determinacije za predloženi model $R^2_{\text{pril}} = 0,6557$ govori da je 65,57% modela objašnjivo s odabranim faktorima, što govori da postoje još neki faktori koji nisu uzeti ovim eksperimentom u obzir. Predviđajući koeficijent determinacije iznosi $R^2_{\text{pred}} = 0,5682$, što je iznos od 56,82% dobivenih podataka eksperimentalnim modelom, koje je moguće opisati dobivenim predviđajućim modelom za određivanje razlike buke tijekom rada poliamidnih zupčanika u ispitnom području. Tako mali broj potvrđuje utjecaj mjernog uređaja i okolnih poremećaja na rezultate mjerenja, a jedan od mogućih razloga relativno niskog koeficijenta determinacije može biti uzrok i ispitno područje. Mjereno je područje na rubu granica opteretivosti što je rezultiralo velikim brojem zupčanika koji su relativno brzo zadovoljavali svoj radni vijek te nije dolazilo do klasičnog uhodavanja zupčanika za stalni rad. Usprkos tome može se reći da je na osnovi predloženog modela moguće dati trend promjene buke za određene parametre.

5.7.1 Predloženi model određivanja promjene buke

Provedbom eksperimenta prema predloženom planu pokusa (poglavlje 5.2), te analizom varijance (Tablica 5.16) za podatke eksperimenta u Tablici 5.13 dobiven je model koji opisuje rezultate promjene razine buke s pomoću jednadžbe 5.12 .

$$\Delta b = C_0 + C_1 \cdot B + C_2 \cdot C - C_3 \cdot A \cdot B - C_4 \cdot C^2 - C_5 \cdot A^2 \cdot B + C_6 \cdot A \cdot B^2 \quad (5.12)$$

pri čemu je

Δb - razlika buke na početku i tijekom rada, dB

A - opterećenje T , Nm

B - promjena pomaka profila, J_i , mm

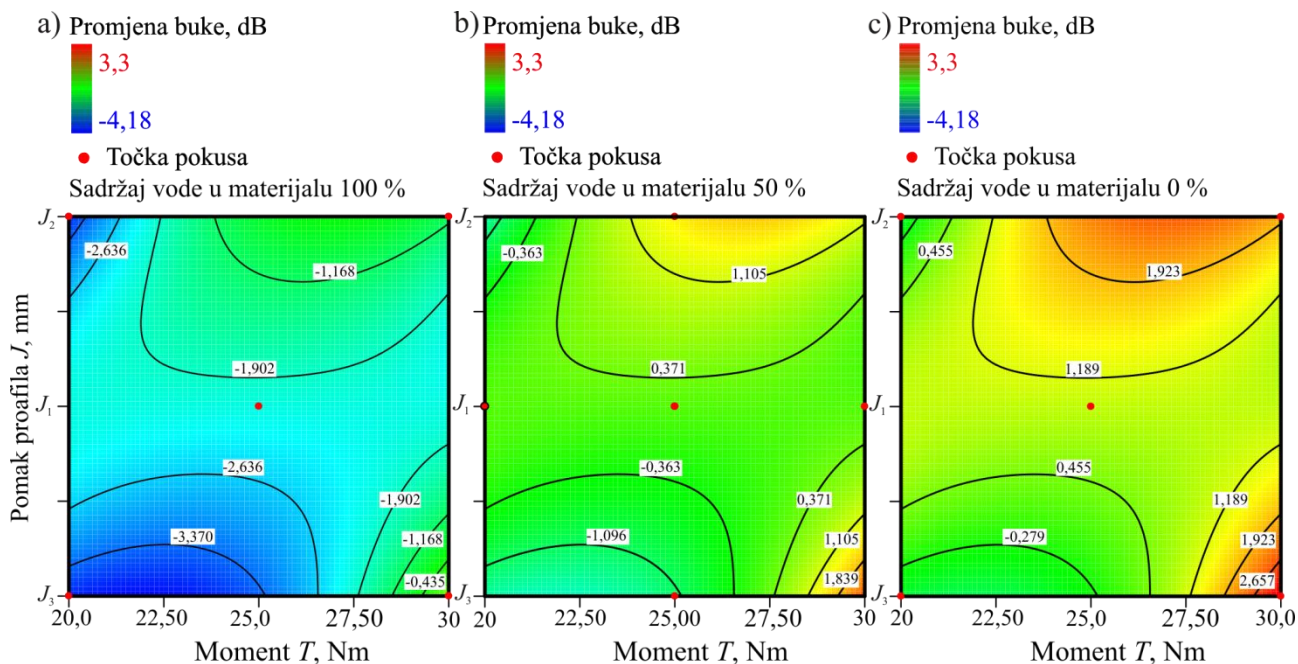
C - stanje materijala, % rh

Konstante $C_0 \dots C_6$ prikazane su u Tablici 5.17 .

Tablica 5.17 Konstante modela promjene buke tijekom rada zupčanika

Konstanta	Vrijednost
C_0	0,17
C_1	1,34
C_2	1,55
C_3	0,37
C_4	0,73
C_5	1,66
C_6	1,72

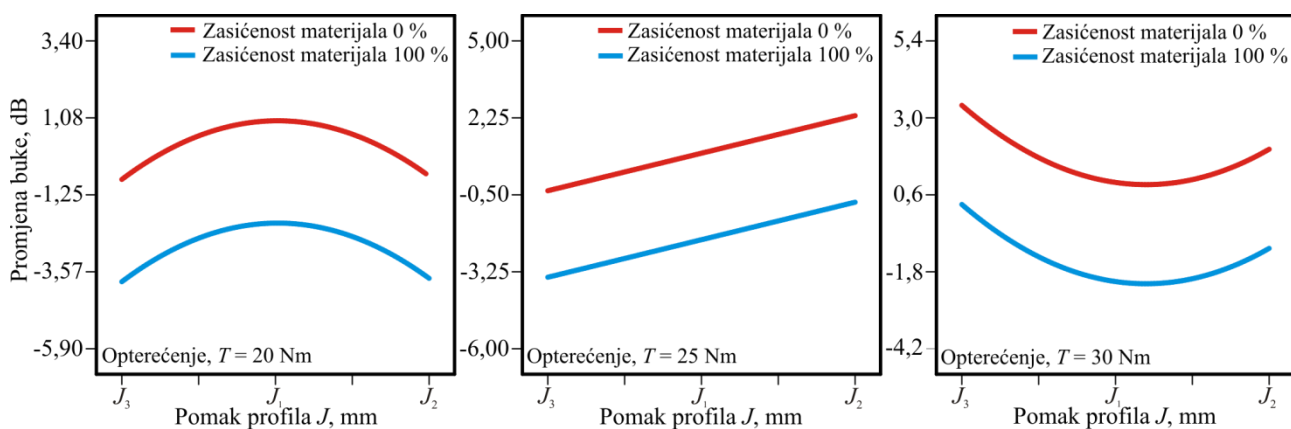
Model dan jednadžbom 5.12 prikazan je na Slici 5.41, dana je raspodjela za sva tri faktora. Analiziranjem dijagrama na Slici 5.41 a), moguće je primijetiti raspodjelu negativnih vrijednosti razlike buke kod uzoraka s visokim postotkom vlage u materijalu. Odnosno dolazi do sveukupnog smanjenja buke prema početnim vrijednostima buke za sve režime rada. Najveće prigušenje buke moguće je postići u području opterećenja od 20 Nm do 25 Nm za iznose pomaka profila J_3 , uz manja odstupanja prema pomaku J_1 . Područje momenta oko 22.5 Nm ima najširi raspon mogućih pomaka profila što osigurava najveće prigušenje buke. Povećavanjem pomaka profila prema J_2 te opterećenja, dolazi do sniženja prigušenja. Dijagram na Slici 5.41 b) prikazuje prijelaznu pojavu između prigušenja i povećanja buke tijekom rada. Prigušenje je prisutno u području od 20 do 27.5 Nm za iznose pomaka profila od J_3 do polovice prema J_1 , ostale kombinacije parametara daju povišenje razine buke za poliamid s 50% zasićenosti vodom. Sušenjem materijala (Slika 5.41 c)) dolazi do daljnjeg smanjivanja područja s prigušenjem buke. Područje višeg opterećenja daje izrazito povišenje iznosa buke te u kombinaciji s pomakom profila J_2 dolazi do izrazito nemirnog rada, što je povezano s krajem životnog vijeka i ubrzanim povišenjem temperature u zahvatu. Općenito je moguće dati trend prigušenja iznosa buke za područje ispitnog opterećenja u rasponu od 20 do 25 Nm za područje pomaka profila od J_3 ($x_1 = 0,2956$ mm, $x_2 = -0,2956$ mm) do polovice prema J_1 ($x_1 = 0,0849$, $x_2 = -0,0849$), odnosno u rasponu za $x_1 = 0,2956$ do $0,19025$ mm te $x_2 = -0,2956$ mm do $-0,19025$ mm.



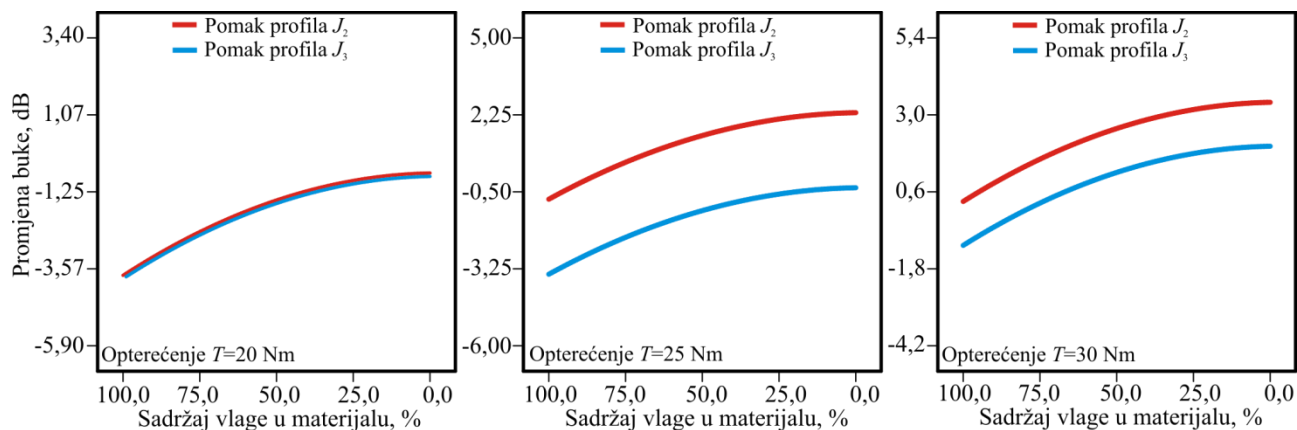
Slika 5.41 Grafički prikaz modela promjene buke u odnosu na početak i sredinu radnog vijeka: a) 100%-tna zasićenost materijala vodom; b) 50%-tna zasićenosti materijala vodom; c) 0%-tna zasićenosti materijala vodom

Prema prethodnim slikama prikazano je da je utjecaj vode bitan faktor u određivanju iznosa buke, nastale tijekom rada. Na Slici 5.42 prikazana je ovisnosti pomaka profila kod krajnjih varijanata zasićenja vodom gdje je moguće uočiti približno isto usporedno povećanje razine buke po cijelom rasponu pomaka profila za sva ispitna opterećenja. Dijagram ovisnosti vlage prema iznosu promjene razine buke (Slika 5.43) kod različitih opterećenja, prikazuje vrlo malu razliku između pomaka profila za slučaj opterećenja ispod granice opteretivosti (20 Nm) dok je, primjerice, najveća razlika uočena kod opterećenja od 25 Nm. Na tom opterećenju postoji najveći utjecaj pomaka profila na iznos buke, a daljnjim se povećanjem opterećenje snižava na nešto manji iznos.

Tijekom istraživanja ovisnosti buke, nije uziman u obzir utjecaj temperature te su mjerenja provedena tijekom rada zupčanika, no pokazalo se da je utjecaj temperature dosta bitan kod polimernih materijala i to nameće potrebu za istraživanjem utjecaja temperature na promjenu buke u interakciji s ispitnim faktorima.



Slika 5.42 Ovisnost promjene razine buke o pomaku profila za određena ispitna opterećenja



Slika 5.43 Ovisnost promjene razine buke o postotku zasićenosti materijala za određena ispitna opterećenja

5.8 Ovisnosti radnih parametara pokusa o zadovoljavanju radnih uvjeta

Ispitivanja na polimernim zupčanicima PA 6 provedena su prema zadanim parametrima (poglavlje 5.3) na stroju sa zatvorenim tokom snage, do zadovoljavanja jednog od tri kriterija radnog vijeka (poglavlje 5.3.2). Ovisno o zadanim radnim parametrima zapaženo je da je opterećenje, uz stanje materijala, glavni faktor određivanja tipa zadovoljavanja radnog vijeka. U Tablici 5.13 dan je prikaz zadovoljavanja radnog vijeka prema ulaznim parametrima, gdje je:

RU1 – istrošenost zuba ispod granice zašiljenosti, prema poglavlju 5.3.2;

RU2 – zadovoljavanje $3 \cdot 10^6$ ciklusa odnosno, 50 h rada na boju okretaja motora $n = 1000 \text{ min}^{-1}$;

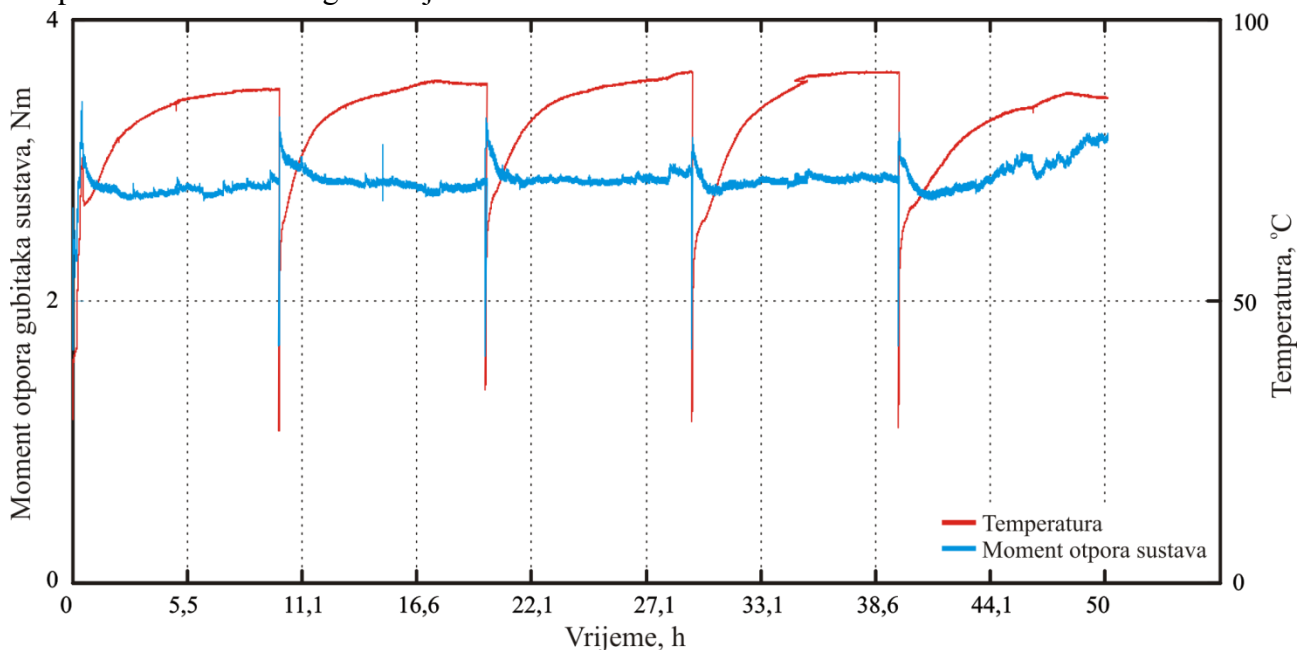
RU3 – toplinsko zaribavanje.

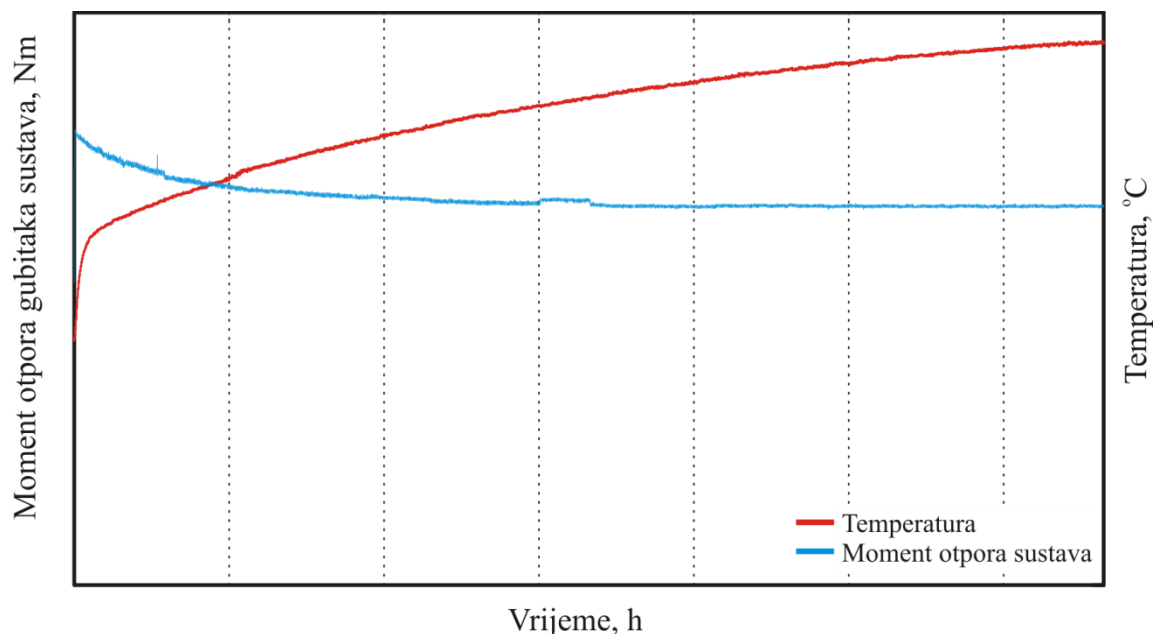
Provedbom ispitivanja prema Tablici 5.13, uočeno je da većinom zupčanci s nižim opterećenjem zadovoljavaju radni vijek RU2 koji se odnosi na ostvarivanje broja ciklusa od $3 \cdot 10^6$ ponavljanja, osim ispitnih tijela s visokim postotkom zasićenosti materijala vodom. Većina zupčanika u graničnom području opterećenja iznad 20 Nm, koji nisu ostvarili kriterij zadovoljavanja radnog vijeka RU2, zadovoljili su kriterij radnog vijeka preko RU3 uvjeta. U samo dva slučaja zadovoljen je kriterij radnog vijeka preko istrošenosti debljine zuba (RU1). Tijekom provedbe ispitivanja u šest slučajeva, uočena je pojava pukotine u korijenu zuba (Slika 5.44) ali je na kraju došlo prije do toplinskog zaribavanja (RU3) ili istrošenja debljine zuba nego li loma zuba. Ujedno je uočeno da kod zupčanika s višim postotkom vlage dolazi do pojave pukotine malo ispod kinematske kružnice. Na osnovi takvog zadovoljavanja radnog vijeka može se izvesti zaključak da je temperaturno zaribavanje bokova zuba kod zupčanika od PA 6 prevladavajući način ostvarivanja radnog vijeka zupčanika unutar područja ispitnog opterećenja. Ako se za granicu opteretivosti odabere zadovoljavanje $3 \cdot 10^6$ ciklusa kod brzine vrtnje $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ manjeg zupčanika, proizlazi da opterećenje od 20 Nm zadovoljava taj uvjet kod zupčanika s 50% zasićenosti materijala vodom ili manje.



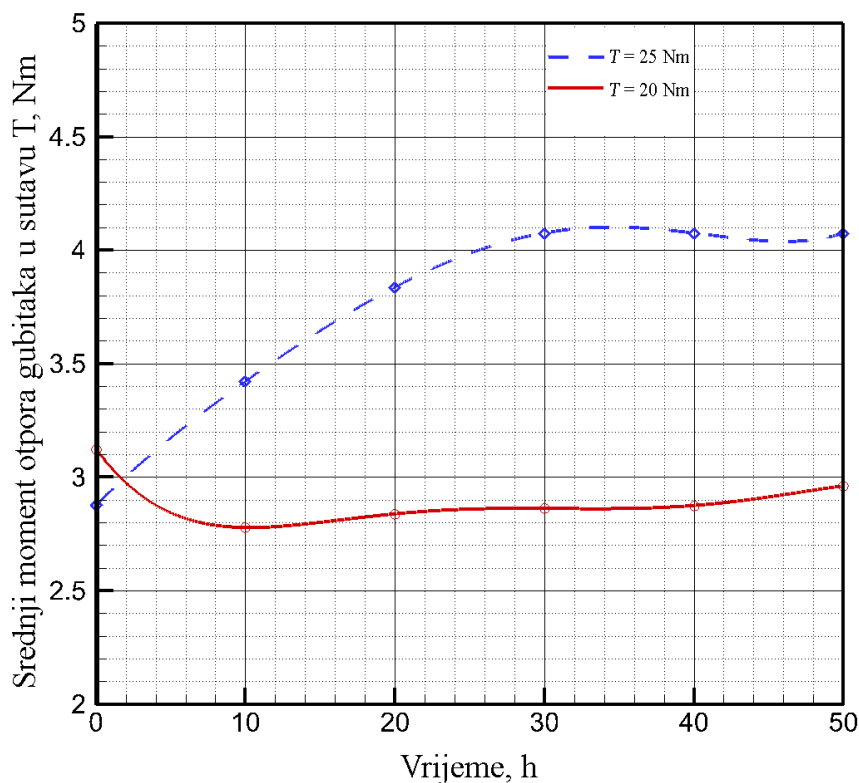
Slika 5.44 Pukotina na polimernom zupčaniku

Dijagram promjene temperature boka zuba kod ispitnih tijela, koja su zadovoljili kriterij radnog vijeka preko RU2, prikazani su Slikom 5.45, gdje je moguće vidjeti kretanje temperature zahvata tijekom cijelog radnog vijeka zupčanika, usporedno s prikazom momenta otpora cijelog sustava. Periodičko gašenje nakon svakih 10 h rada jasno je vidljivo prikazom povišenja temperature u zahvatu tijekom određenog vremena. Iscrpniji prikaz promjene momenta otpora i temperature zahvata prikazan je na Slici 5.46, gdje je moguće uočiti pad momenata otpora u sustavu, uz istovremeno povišenje temperature u zahvatu. Razlog tome najvjerojatnije je u promjeni elastičnosti zuba. Povišenjem temperature zupčanika dolazi do povećanja progiba zuba, odnosno do mogućeg povećanja stupnja prekivanja što pridonosi boljoj raspodjeli opterećenja na više zuba u radu i smanjenju ukupnog otpora u sustavu, te pridonosi mirnijem radu. Na dijagramu 5.47 prikazana je promjena otpora tijekom radnog vijeka zupčanika za dva različita opterećenja. Kod opterećenja od 20 Nm uočljivo je povišenje otpora u prvih 5 h te daljnje smanjenje, uz stabilizaciju do kraja radnog vijeka, dok kod opterećenja od 25 Nm dolazi do većih oscilacija u momentu otpora sustava koje se mijenja tijekom vremena, što je i očekivano jer dolazi do razvoja povišene temperature i intenzivnog trošenja.

Slika 5.45 Raspored srednjih temperatura boka zuba i momenta otpora sustava tijekom radnog vijeka zupčanika uz opterećenje $T = 20 \text{ Nm}$ pri pomaku profila J_2 i brzini vrtnje $n = 1000 \text{ min}^{-1}$



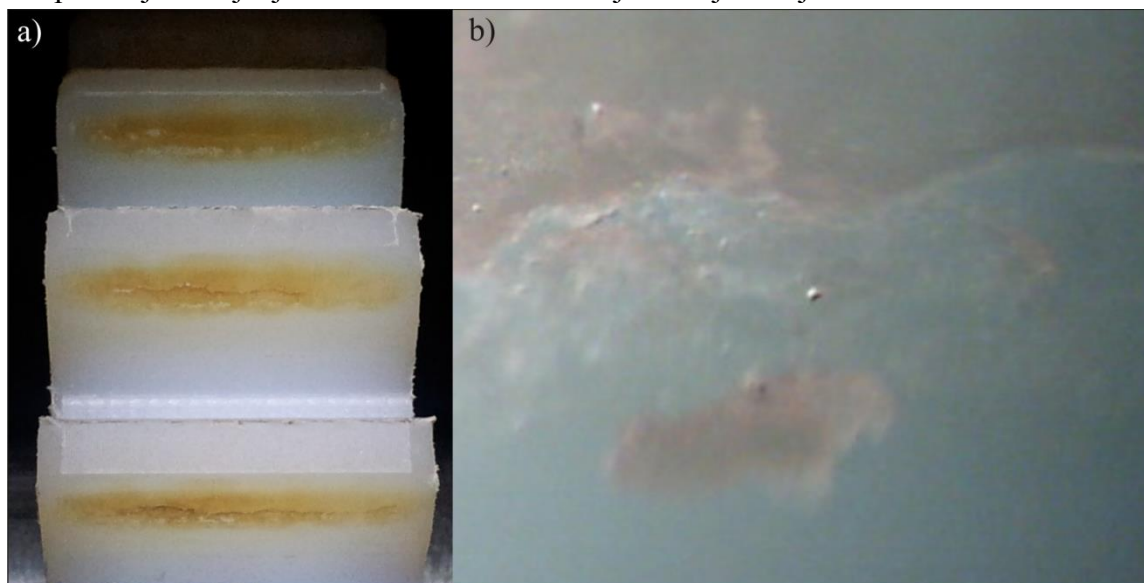
Slika 5.46 Tendencija promjene momenta otpora u sustavu naspram promjene srednje temperature boka zuba



Slika 5.47 Srednji momenti otpora uređaja tijekom radnog vijeka zupčanika

Analiziranjem ispitnih tijela koja su zadovoljila radni vijek prema radnom uvjetu RU2, odnosno $3 \cdot 10^6$ ciklusa, primijećena je pojava promjene u boji boka zuba. Tijekom rada dolazi do stvaranja tankog sloja materijala koji promjeni boju najvjerojatnije zbog visoke temperature dodira. Na Slici 5.48 prikazana je pojava sloja s promjenom boje, odnosno uvećanjem je moguće vidjeti tragove taljenja i visoke temperature u dodiru. Jasno je uočljiva pojava tragova klizanja na području iznad i ispod točke valjanja. Tanki sloj materijala koji se stvara dugotrajnim radom otkida se sniženjem temperature na početku rada, odnosno kad su zupčanici hladni. Na Slici 5.49 vidljivi su tragovi trganja slojeva, dolazi do povećanja neravnina boka zuba, odnosno povećanja trenja, što

može biti jedan od uzroka povećanih otpora na početku rada. Područje oko kinematskog pola, odnosno područja kotrljanja nema obično izražen sloj materijala koji se otkida.



Slika 5.48 Izgled boka zuba zupčanika nakon $3 \cdot 10^6$ ciklusa, $T = 20 \text{ Nm}$, $n = 1000 \text{ min}^{-1}$: a) bok zuba, b) uvećanje boka zuba



Slika 5.49 Trganje slojeva materijala na boku zuba nakon 40 h rada, $T = 20 \text{ Nm}$, $n = 1000 \text{ min}^{-1}$

5.8.1 Energija spektra u ovisnosti o radnim parametrima

Uspješnost procjene signala procesa uvelike ovisi o kvaliteti snimljenih signala, odabranom načinu filtriranja te poznavanju dinamike promjene snimljenih signala. Zbog iznimne složenosti procesa koji se javljaju tijekom rada zupčanih parova, dodajući još i dinamiku cijelog uređaja, nije bilo moguće dobiti jednoznačne kriterije procjena životnog vijeka iz torzijskih vibracija cijeloga sustava. Periodičko mjerenje torzionih vibracija tijekom vremena, provedeno je u intervalu od svakih 5 h odnosno 300 000 ciklusa na brzini od $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ pod punim radnim opterećenjem do kraja životnog vijeka polimernog zupčanika. Frekvencija snimanja $f = 9600 \text{ Hz}$ odabrana je u svrhu zadovoljavanja uvjeta o minimalno dvostrukom uzrokovanju prema promatranoj promjeni. U Tablici 5.18 dane su promatrane frekvencije rada zupčanika.

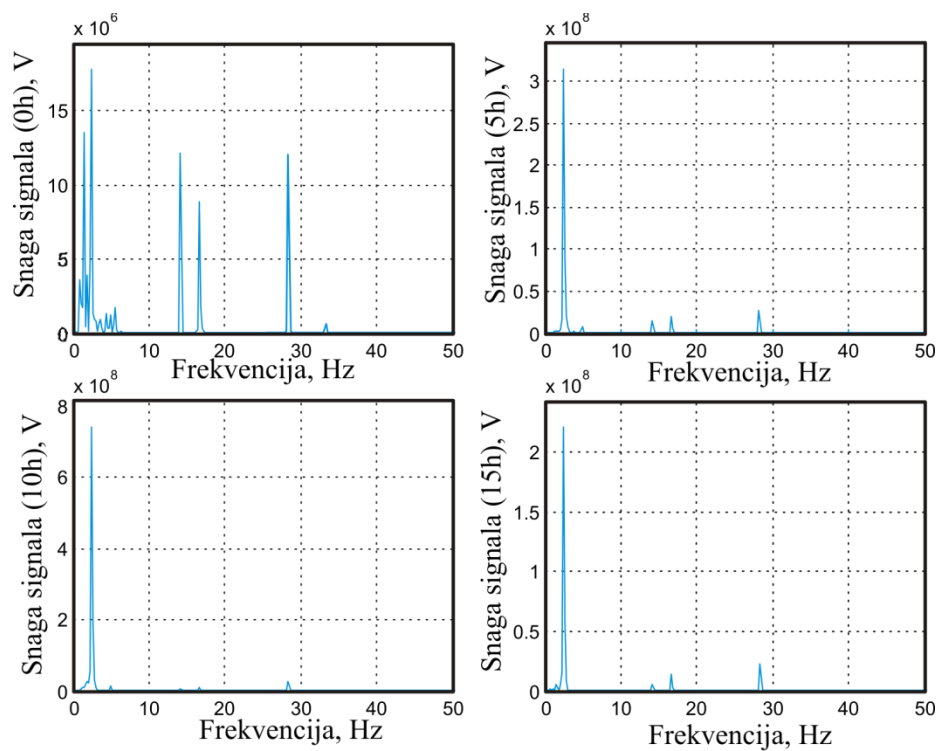
Tablica 5.18 Karakteristične frekvencije ispitnog zupčanika

Opis	Oznaka promatrane frekvencije
Frekvencija vratila manjeg zupčanika	$f_{z1} = f_{motora} = \frac{1000}{60} = 16,66 \text{ Hz}$
Frekvencija vratila većeg zupčanika	$f_{z2} = \frac{z_1 \cdot f_{z1}}{z_2} = \frac{23 \cdot 16,66}{27} = 14,19 \text{ Hz}$
Frekvencija vratila većeg zupčanika, drugi harmonik	$f_{z2} = f_{z2} \cdot 2 = 14,19 \cdot 2 = 28,38 \text{ Hz}$
Frekvencija zubi u zahvatu	$f_{zah} = z_1 \cdot f_{z1} = 23 \cdot 16,66 = 383,4 \text{ Hz}$
Frekvencija zubi u zahvatu, drugi harmonik	$f_{zah2} = f_{zah} \cdot 2 = 766,8 \text{ Hz}$

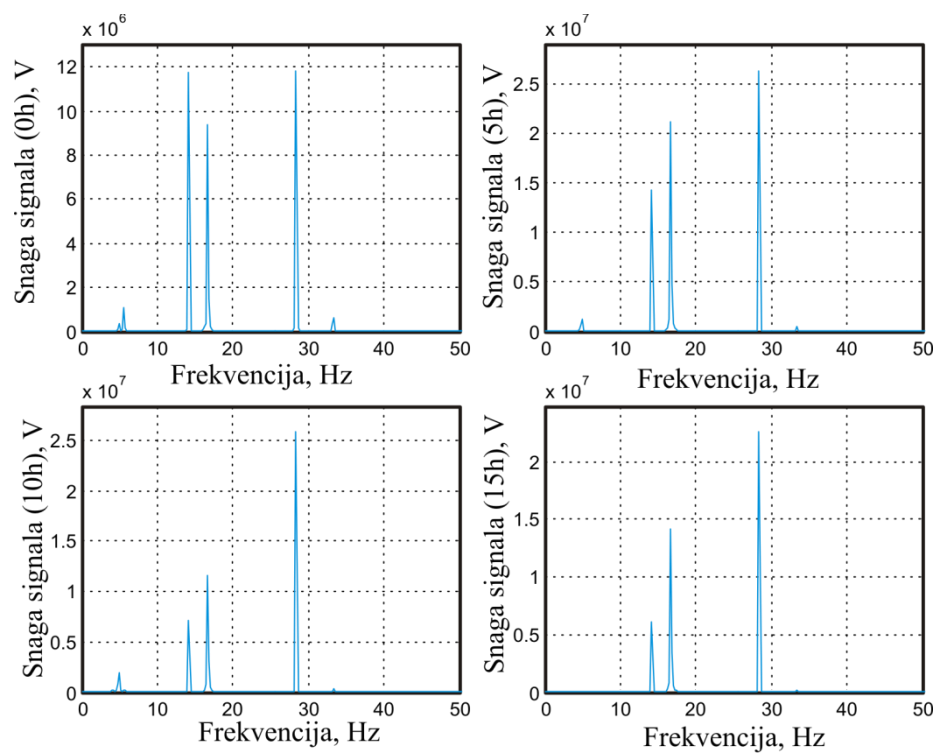
Signali vibracija analizirani su u frekvencijskoj domeni, primjenom Fourierove transformacije (*e. Fast Fourier Transformation*, FFT), da bi se odredio odgovarajući filter s kojim bi se signali pripremili za izdvajanje značajki u vremenskom području. Analiza spektra (Slike 5.50 i 5.51) pokazala je da je dominantna komponenta spektra vezana uz frekvenciju 5 Hz i njoj susjedne frekvencije. Stoga je za filtriranje signala odabran Butterworthov niskopropusni filter granične (*e. cutoff*) frekvencije $f_c = 5 \text{ Hz}$. Relativno niske frekvencije koje su se pojavljivale tijekom rada vezane su na vibracije sustava te ih je u nefiltriranom signalu moguće vidjeti kao velike amplitude koje dominiraju dijagramom (Slika 5.50). Povećanje vibracija uređaja do frekvencije $f_c = 5 \text{ Hz}$ tijekom radnog vijeka zupčanika koje se odnose na vibraciju postolja nisu promatrane tijekom analize. Na Slici 5.52 dan je prikaz signala prije analize primjenom Fourierove transformacije gdje je moguće vidjeti povećanje ukupne amplitude torzijskih vibracija povećanjem broja ciklusa rada. Daljnjom analizom dijagrama FFT analize provedena je klasifikacija očekivanog trenda promjene energije u spektru, Tablicama 5.19 i 5.20 za skupinu ispitnih tijela opterećenih tijekom radnog vijeka s 20 Nm i 25 Nm. Povećanje spektra u konačnici odnosi se na povećanje vibracija cijelog sustava, odnosno na poremećaje amplituda određenih frekvencija zupčanika, što ukazuje na nemiran rad zupčanika i očekivane uzroke prestanka rada zupčanog para. Energija u rasponu opterećenja od 30 Nm nije promatrana jer su uzorci pod tim opterećenjem imali iznimno kratak radni vijek te ne postoji praktična potreba za takvom analizom. Energija u segmentima frekvencijskog spektra određena je iz površine ispod krivulje spektralne gustoće snage, prema izrazu 5.13

$$\psi_f^2 = (f_g - f_d) \frac{1}{N} \sum_{f=f_d}^{f_g} P_f \quad (5.13)$$

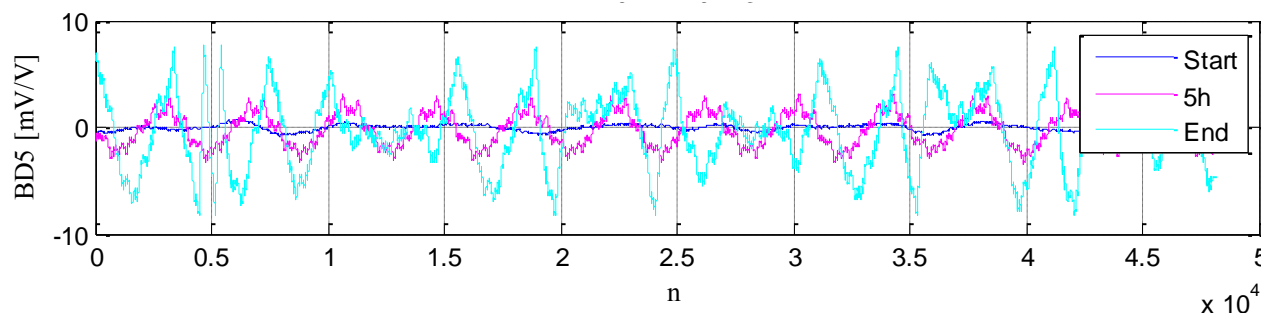
gdje su f_g i f_d gornja i donja granica frekvencijskog spektra za koji se računa energija, P_f je snaga spektralne komponente frekvencije f , a N je broj komponenti spektra u intervalu $[f_d, f_g]$. Energija se računa za cijelo mjerno područje do drugog harmonika ($f_d = 5 \text{ Hz}$, $f_g = 50 \text{ Hz}$). Područje gornje frekvencije računanja od $f_g = 50 \text{ Hz}$ izabran je u svrhu obuhvaćanja frekvencije zubi u zahvatu f_{zah} u izračun energije.



Slika 5.50 FFT analiza nefiltriranog signala



Slika 5.51 FFT analiza filtriranog signala



Slika 5.52 Signal prije obrade FFT analizom

Trendovi promjene energije spektra obzirom na ispitno opterećenje od 20 Nm za ispitana tijela koja su ostvarila $3 \cdot 10^6$ ciklusa, uočeno je kolebanje energije sustava oko srednjih vrijednosti prema Tablici 5.19 za tri ponavljanja tijekom cijelog radnog vijeka. Ispitana tijela bila su u području zasićenosti vodom, u rasponu od 0 do 50%. Vrijednosti su se prvo povećale do postizanja radne temperature, dok je kod pojedinih ispitnih tijela u početnoj fazi rada zabilježeno privremeno povećanje energije koja daljnjim radom nestaje. Takvi poremećaji smatrani su svojevrsnim uhodavanjem prijenosnika, a nakon prijelaznog razdoblja nastupa stabilizacija bez naglih promjena do kraja radnog vijeka. Za razliku od ispitnih tijela koja su bila tretirana vodom zbog snižavanja granice opteretivosti koja nastupa promjenom mehaničkih svojstva materijala, dobiveni rezultati pokazuju nestabilan rad s velikom energijom sustava, što se odražava nemirnim radom uređaja te brzim temperaturnim zaribavanjem ispitnih zupčanika.

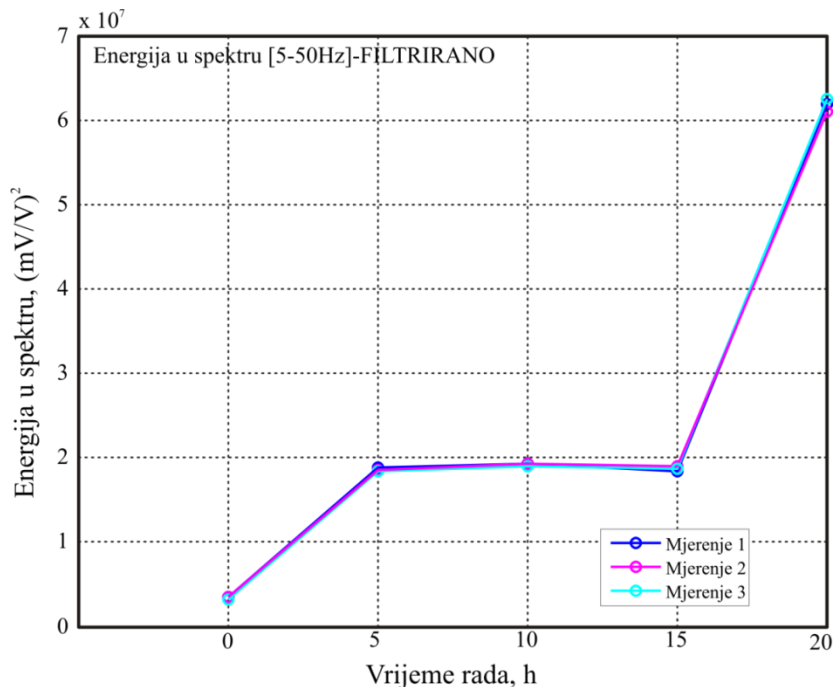
Tablica 5.19 Trend promjene energije sustava za opterećenje $T = 20$ Nm

Ispitno opterećenje : $T = 20$ Nm, brzina vrtnje $n = 1000 \text{ min}^{-1}$			
Oznaka uzorka	Trend promjene energije sustava prema početku rada	Iznos prosječne energije sustava $[(\text{mV/V})^2]$	Opis
1005	→	$1,061 \cdot 10^7$	Ostvareno $3 \cdot 10^6$ ciklusa, RU2
2003	→	$1,4 \cdot 10^7$	Ostvareno $3 \cdot 10^6$ ciklusa, RU2
3003	→	$1,08 \cdot 10^7$	Ostvareno $3 \cdot 10^6$ ciklusa, RU2
2002	↘	$0,6 \cdot 10^8$	100% zasićenost zupčanika vodom, pojava loma ispod kinematskog pola, RU3
3002	↗	$8 \cdot 10^7$	100% zasićenost zupčanika vodom, RU3

Ispitni zupčanici koji su radili u području ispitnog opterećenja oko 25 Nm, prema Tablici 5.20 pokazuju trend rasta kod svih ispitnih tijela. Pojavom intenzivnog trošenja tijekom rada dolazi do nepredvidivih promjena u energiji spektra te je zavisno od vrste zadovoljavanja radnog vijeka. trend porasta energije spektra iznenadan ili kontinuiran. Zupčanici koji su zadovoljili radni vijek istrošenjem debljine zuba (RU1), pokazuju kontinuirani rast energije spektra do pojave pukotine, uz naglo povećanje energije sustava u konačnici. Usporedbom iznosa energija sustava u Tablicama 5.19 i 5.20 moguće je primijetiti povišene vrijednosti energije kod opterećenja od 25 Nm. Uočene su određene razlike u iznosima kod zupčanika koji su završili radni vijek pukotinom na zubu u

usporedbi s ispitnim zupčanicima bez pukotine. Na Slici 5.53 prikazana je energija spektra tijekom radnog vijek zupčanika, s pojavom pukotine na kraju radnog vijeka zupčanika.

Razmatranjem energije spektra kod ispitnih uzoraka nije bilo moguće odrediti jednoznačni uvjet energije spektra koja bi ukazivala na mogući defekt prijenosnika analiziranjem torzijskih vibracija.



Slika 5.53 Energija spektra, $T = 25 \text{ Nm}$, pomak profila J_1 , brzina vrtnje $n = 1000 \text{ min}^{-1}$

Tablica 5.20 Trend promjene energije sustava za opterećenje $T = 25 \text{ Nm}$

Ispitno opterećenje: $T = 25 \text{ Nm}$, brzina vrtnje $n = 1000 \text{ min}^{-1}$			
Oznaka uzorka	Trend promjene energije sustava prema početku rada	Iznos prosječne energije sustava $[(\text{mV/V})^2]$	Opis
1006	↗	$8,5 \cdot 10^8$	Nagli rast, pojava pukotine u korijenu zuba, RU1
1008	↗	$7,4 \cdot 10^7$	Pojava pukotine u korijenu zuba, RU3
1009	↗	$2,8 \cdot 10^7$	Ubrzano trošenje te rast do zadovoljavanja RU3
1010	↗	$12,6 \cdot 10^8$	Naglo povećanje energije, lom zuba u korijenu, RU3
1011	↗	$6,2 \cdot 10^7$	Polagani rast tijekom trošenja, pojava pukotine u korijenu zuba, RU1
1012	↗	$3,4 \cdot 10^8$	Ubrzani rast energije, lom više zuba tijekom zaribavanja, RU3
2004	↗	$4,7 \cdot 10^8$	Rast zbog zaribavanja, RU3
3004	↗↘	$7 \cdot 10^7$	Visoka energija kod povišene temperature boka, kratkoročni pad kod niže temperature zaribavanja uzorka, RU3

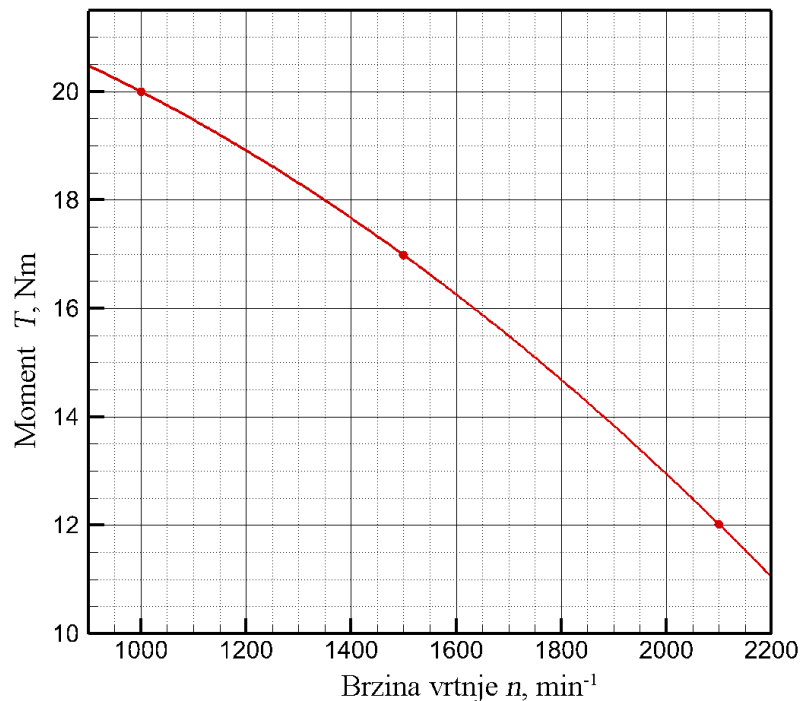
5.9 Opteretivost polimernih zupčanika u ovisnosti o različitim brzinama vrtnje

Opteretivosti polimernih zupčanika prema [38], ovisi o brzini vrtnje samo kod visokih opterećenja, dok utjecaj brzine vrtnje iščezava kod nižih opterećenja. Provedbom eksperimenata u poglavlju 5.5, dobivene su granice opteretivosti prema kriteriju zadovoljavanja broja ciklusa od minimalno $3 \cdot 10^6$ ulazaka zuba u zahvat manjeg zupčanika. Dobivenom granicom od 20 Nm za ispitne zupčanike, prema poglavlju 5.3.2 te ispitnom brzinom vrtnje od $n_1 = 1000 \text{ min}^{-1}$, dana je osnova za daljnje proširivanje granice opteretivosti na različite brzine vrtnje. Granice opteretivosti posebno su važne za veći raspon brzina te su u svrhu njihova proširivanja dane brzine od $n_2 = 1500 \text{ min}^{-1}$ te $n_3 = 2100 \text{ min}^{-1}$ okretaja manjeg zupčanika prema ispitnom postolju, opisanoj u poglavlju 4.1. Prema zaključcima iz poglavlja 5.5 gdje je utvrđeno da na broj ciklusa kod radnih parametara ne utječe bitno pomak profila, zadržan je pomak profila koji osigurava optimalnu raspodjelu obodnih brzina klizanja bokova zuba (J_1) te su sva daljnja ispitivanja rađena prema pomaku profila J_1 u Tablicama 5.5 i 5.6. Prema zaključcima iz poglavlja 5.8, usvojen je način ostvarivanja radnog vijeka prema radnim uvjetima RU2 za slučaj zadovoljavanja granice opteretivosti te uvjet RU3 u slučaju nezadovoljavanja granice opteretivosti. Usvajanje uvjeta RU3 kao uvjeta nezadovoljavanja donesen je na osnovi dosadašnjih rezultata ispitivanja te broja ispitnih tijela koja su završila radni vijek temperaturnim zaribavanjem (RU3). Granica opteretivosti usvojena je ako su barem tri različita ispitna zupčanika zadovoljila uvjet RU2, odnosno minimalno $3 \cdot 10^6$ ciklusa. U Tablici 5.21 prikazani su rezultati provedenih ispitivanja, te je obradom podataka koji zadovoljavaju uvjet RU2 dobiven dijagram na Slici 5.54, kojim je pokazana raspodjela opteretivosti polimernih zupčanika od ekstrudiranog poliamida (PA6) kod prosječno 50% zasićenja vodom. Ispitivanja su provedena na sobnoj temperaturi s odstupanjem $\pm 2^\circ\text{C}$. Sukladno rezultatima iz poglavlja 5.5, moguće je dati pretpostavku da će se granice opteretivosti smanjivati s povišenjem stupnja zasićenosti materijala vodom i da je moguće očekivati rast opteretivosti sa snižavanjem stupnja zasićenosti.

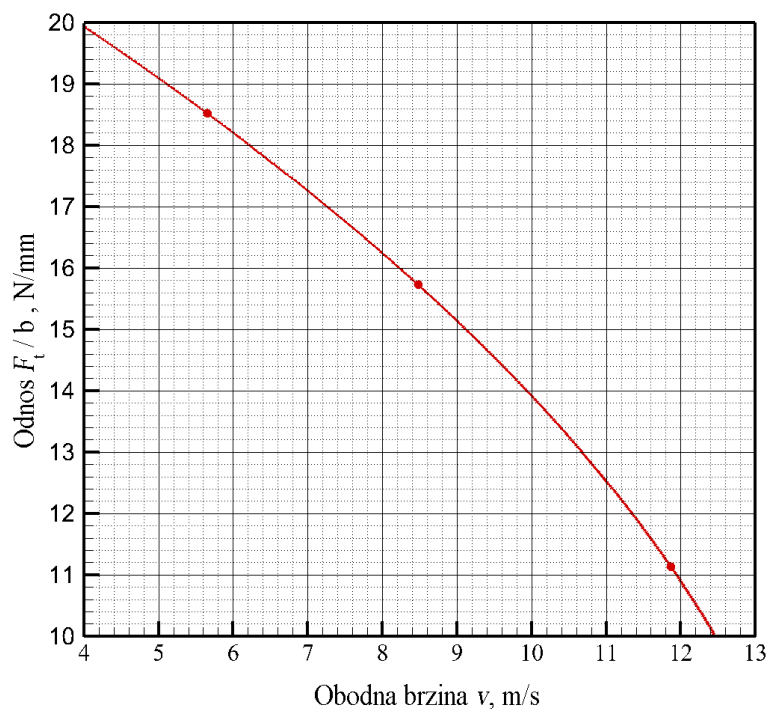
Tablica 5.21 Rezultati provedbe testa opteretivosti na različitim brzinama vrtnje

Opterećenje T [Nm]	Ostvareni broj ciklusa N	Brzina vrtnje [min^{-1}]	Zadovoljen radni uvjet
11,98	3042200	2100	RU2
12,006	3042269	2100	RU2
12,064	3042165	2100	RU2
14,92	1769950	2100	RU3
16,9	735700	2100	RU3
16,93	3082125	1500	RU2
17,003	3078835	1500	RU2
17,014	3095575	1500	RU2
17,962	1939175	1500	RU3
18,07	1053500	2100	RU3
20,091	151025	1500	RU3
21,34	545157	1500	RU3
22,5	261325	1500	RU3

Analizom dijagrama na slici 5.54 vidljivo je sniženje granice opteretivosti s povišenjem brzine vrtnje, što je očekivano s obzirom na ovisnost polimernih materijala o vremenu relaksacije (poglavlje 2.2.3), odnosno smanjeno je vrijeme relaksacije povećanjem brzine vrtnje uz istovremeno povećanje temperature. Općenitiji prikaz opteretivosti zupčanika dobiven preko odnosa obodne sile na diobenom promjenu (F_t) i širine zupčanika (b) za obodne brzine diobenih promjera (v), dan je na Slici 5.55.



Slika 5.54 Opteretivost zupčanika od PA 6 kod različitih brzina vrtnje



Slika 5.55 Ovisnost odnosa obodne sile i širine zupčanika od PA 6 kod različitih obodnih brzina

5.10 Analiza rezultata

Analiza rezultata pokusa dobivenih centralno kompozitnim planom provedena (poglavlje 5.2) je na osnovi tri moguća kriterija kojima se detektira zadovoljenje radnog vijeka polimernog zupčanika prema ispitnim parametrima. Prvi kriterij odnosi se na normu ISO 6336-3 gdje je usporedno s metalnim zupčanicima definiran broj ostvarenih ciklusa do područja trajne čvrstoće, odnosno vijeka preživljavanja od $N_L > 3 \cdot 10^6$ ciklusa. Drugi kriterij provedbe analize zadovoljavanja radnog vijeka odnosi se na povećanje otpora u sustavu pri iznosu iznad 25% u odnosu na ispitno opterećenje. Taj kriterij se tijekom rada manifestira i kao temperaturno zaribavanje, pri čemu je posljednji, treći kriterij, postavljen na osnovi istrošenosti zuba u svrhu detekcije područja intenzivnog trošenja zuba. Provedba ispitivanja provodila se do zadovoljavanja jednog od prethodno spomenutih kriterija.

U sklopu ispitivanja provedeno je mjerenje na sveukupno 36 različitih zupčanih parova, od koji 4 para za približno određivanje granica opteretivosti, 20 parova za potrebe provedbe centralno kompozitnog plana pokusa, te ostalih 12 parova za provedbu dodatnih ispitivanja verificiranja rezultata i proširivanja granica opteretivosti raspona brzina vrtnje od 1000 min^{-1} do 2100 min^{-1} . Sukladno provedenim mjerenjima moguće je izvesti sljedeće zaključke:

- Promjena mase tijekom rada polimernih zupčanika ovisna je o opterećenju, sadržaju vode u materijalu te pomaku profila. Analizom je dobiveno da se veliki utjecaj na promjenu mase postiže interakcijom opterećenja i vode u materijalu. Područje najveće promjene mase nalazi se u području iznad granice opteretivosti pri opterećenju oko 25 Nm za područje zasićenja materijala vodom približno 50% (Slika 5.21).
- Područje opterećenja iznad 20 Nm prema prethodnoj točki može se smatrati područjem povišenog trošenja boka zuba poliamidnih (PA 6) zupčanih parova za cijelo područje zasićenosti materijala vodom.
- Dugotrajnim izlaganjem poliamidnih (PA6) zupčanika radnoj okolini s visokim postotkom vode, doći će do smanjenja gubitka mase za radno opterećenje od 20 Nm. Uzrok tome je smanjenje tvrdoće materijala, odnosno niskog broja postignutih ciklusa, prema Tablici 5.8.
- Opteretivost PA 6 zupčanih parova koji rade u kombinaciji materijala PA 6 / PA 6, ovisna je o opterećenju i zasićenosti materijala vodom. Nije uočen utjecaj pomaka profila na ostvoreni broj ciklusa, (izraz 5.8).
- Opteretivost PA 6 zupčanih parova koji rade u području visokog postotka zasićenosti materijala vodom, nalazi se značajno ispod 20 Nm za brzinu vrtnje 1000 min^{-1} . Moguće je očekivati lagani rast granice opteretivosti sa snižavanjem udjela vlage u materijalu.
- Zasićenost materijala vodom u iznosu od 50% ima granicu opteretivosti od 20 Nm za brzinu vrtnje 1000 min^{-1} (Slika 5.28).
- Povećanje srednje temperature boka zuba nastale zbog rada PA 6 zupčanih parova, signifikantno ovisi o iznosu opterećenja te interakcije opterećenja i stupnja zasićenosti materijala vodom (Tablica 5.14).

- Iznimnim prekoračenjem granica opteretivosti dolazi do snižavanja temperature u zahvatu, ali zbog previsokog kontaktnog (Hertzova) naprezanja dolazi do prestanka rada zupčanika, i pojave iznimno brzog i kratkotrajnog trošenja te gnječenja zuba.
- Poliamidni zupčanici s visokim sadržajem vode u materijalu za područje momenata od 20 Nm do 23 Nm, tijekom rada mogu razviti maksimalnu temperaturu do 126°C tijekom koje dolazi do temperaturnog zaribavanja zupčanika (Slike 5.36 i 5.38).
- Dosežanjem temperature od 115°C tijekom rada poliamidnih zupčanika dolazi do temperaturnog zaribavanja zupčanika, odnosno do taljenja materijala kojem prethodi područje povećanog trošenja.
- Očekivanje srednje temperature koja se javlja kod poliamidnih zupčanika na granici opteretivosti s maksimalnom zasićenošću materijala od 50% iznose 86,16°C, prema Tablici 5.12.
- Polimerni zupčanici u području iznad granice opteretivosti tijekom vremena izloženi su trošenju bokova. Radom takvih zupčanika zbog relativno lošeg odvođenja topline i promjene faktora trenja, dolazi do naglog skoka u temperaturi kod relativno niskog broja ciklusa, nakon čega se javlja nagli rast temperature u krakom razdoblju. Slijedi period manjeg sniženja temperature koje se vrlo brzo pretvara u polagani nastavak rasta temperature do dosezanja kritične temperature od prosječno 115°C i toplinskog zaribavanja, (Slika 5.31).
- Analizom varijance promjene buke, uočen je utjecaj opterećenja, stupnja zasićenosti materijala vodom te pomaka profila unutar granica ispitnih parametara. Utjecaj pomaka profila nema toliko značenje na iznose buke kao opterećenje te stupanj zasićenosti. Utjecaj pomaka profila slabi posebice s povećanjem stupnja zasićenosti.
- Radom poliamidnih zupčanika u paru, tijekom vremena postoji tendencija smanjenja buke, za slučaj rada u okolini s visokim postotkom vode, odnosno visokom zasićenosti materijala. Najveće prigušenje buke moguće je dobiti u području od 20 Nm do 25 Nm kod maksimalne zasićenosti materijala, (Slika 5.41).
- Smanjivanjem udjela vode u materijalu dolazi i do smanjivanja razlike buke prema početku rada. Za ispitni raspon opterećenja dolazi do povećanja buke tijekom rada smanjivanjem stupnja zasićenja u granicama od 50% do 0% zasićenosti, (Slika 5.43).
- Moment otpora ispitnog uređaja ukazuje na iskoristivost ispitnog postolja, povišenjem otpora snižava se djelotvornost uređaja, a time i ispitnih zupčanika. Početkom rada javlja se povišenje momenta otpora koje se nakon zagrijavanja zupčanika spušta na radnu razinu na kojoj se nalazi do kraja radnog vijeka. U slučaju toplinskog zaribavanja dolazi prvo do polaganog povećanja momenta otpora koji u posljednjoj fazi kreće u nagli rast do prestanka rada. Poliamidni zupčanici koji rade ispod granica opteretivosti tijekom svog radnog vijeka ne dostižu ubrzani rast momenta otpora ako ne dolazi do prekoračenja temperature zupčanika koja dovodi do toplinskog zaribavanja, (Slika 5.45).
- Proširivanjem granica opteretivosti na veći raspon brzina vrtnje dolazi do pada granica opteretivosti s povišenjem brzine vrtnje. Opteretivost s obzirom na granicu toplinskog zaribavanja, kod brzine vrtnje 1500 min⁻¹, iznosi 17 Nm dok je kod brzine vrtnje 2100 min⁻¹ granica 12 Nm, (Slika 5.54).

- Za ispitne zupčanike dobiven je prevladavajući način zadovoljavanja radnog vijeka preko temperaturnog zaričavanja.

Primjenom rezultata eksperimentalnih istraživanja te dobivenih zakonitosti iz ovog rada, može se pouzdanije i točnije odrediti očekivani broj ciklusa i, očekivana temperatura boka u zahvatu. To pridonosi dobivanju točnijih vrijednosti potrebnih za ispravno projektiranje ekstrudiranih PA6 zupčanika. Poznavanjem utjecaja radnih stanja na polimerne zupčanike dobiva se bolji uvid u očekivane izlazne vrijednosti kvalitete rada i buke polimernih zupčanika.

5.11 Kritika vlastitog rada i smjerovi budućih istraživanja

Prikazanim rezultatima te iscrpnom analizom, otvorena je dobra osnova za buduće proširivanje ispitivanja. Provedena su ispitivanja samo na jednoj vrsti materijala u paru, u uvjetima bez podmazivanja na ograničenom području brzina vrtnje.

Predlaže se nekoliko smjerova za buduća istraživanja. Proširivanje spoznaja o granicama opteretivosti kod različitih kombinacija sparivanja polimernih zupčanika upotpunilo bi istraživanje te proširilo primjenjivosti polimernih zupčanika u praksi. Upotreba maziva povoljno utječe na radni vijek polimernih zupčanika, nepoznato je kakve su granice opteretivosti u takvim slučajevima. Te kakva maziva daju najbolje rezultate obzirom na trošenje i nosivosti polimernih zupčanika.

Analiza kvalitete rada provedena je samo na jednoj brzini vrtnje prema varijacijama tri faktora (opterećenje, pomak profila, sadržaj vode u materijalu) što daje rezultate ograničavajuće primjene samo za tu brzinu vrtnje. Predlaže se proširivanje istraživanja buke na većem rasponu brzina te različitih kombinacija materijala, dovelo bi do stvaranja određene baze podataka koja bi osiguravala projektantima polimernih zupčanika dostupnost informacija o iznosima buke i kvaliteti rada.

Poznavanjem vibracijskih odziva polimernih prijenosnika te utjecaja pogreške prijenosa na vibracije i buku takvih prijenosnika, dobili bi dobru podlogu za određivanje faktora koji utječu na rad takvih prijenosnika.

Dobivanje uvida o utjecaju ulaznih parametara na radni vijek polimernih zupčanika postavljen je kao glavna vodilja ovoga rada. Nedostatak odgovarajuće literature, uz relativno širok raspon materijala pogodnih za izradu polimernih zupčanika, otvaraju relativno veliko područje koje je potrebno istražiti. Provedbom analize ulaznih parametara prema potrebama industrije, provedena je analiza nekih od najčešće korištenih kombinacija izrade polimernih zupčanika te su dane osnovne smjernice važne za projektiranje takvih kombinacija polimernih prijenosnika.

Tako je, polazeći od pretpostavke dane hipotezom da je moguće odrediti kako pomak profila, sadržaj vode u materijalu i temperatura polimernih zupčanika utječu na ukupni radni vijek zupčanika, proizašla glavna svrha rada, a to je definirati utjecaj glavnih faktora pri određivanju opteretivosti zupčanika od poliamida (PA6). Svrha je bila provedbom eksperimenata dati zakonitosti promjene granica opteretivosti uz određivanje karakterističnih temperatura, nastalih radom polimernih zupčanika u određenim radnim uvjetima, dati vrijednosti numeričkih faktora koji bi opisivali utjecaj ulaznih parametara na maksimalnu dopuštenu temperaturu i granicu opteretivosti.

U svrhu prikupljanja relevantnih mjernih podataka izrađen je ispitni uređaj sa zatvorenim tokom snage za potrebe provedbe ispitivanja. Izrađeni mjerni uređaj omogućuje mjerenje srednje temperature boka izravno tijekom rada.

Postavljena je podjela polimernih zupčanika prema iznosu bočne zračnosti s obzirom na područje primjene uz opis razlika kod projektiranja takvih zupčanika.

Primjenom centralno kompozitnog plana pokusa te koncipiranjem eksperimenta, odabrano je područje opterećenja od 20 do 30 Nm. To se pokazalo ispravnim jer je tim izborom pokriveno granično područje polimernih zupčanika gdje dolazi do kolapsa zupčanika ali i do zadovoljavanja radnog vijeka. Varijacija pomaka profila ograničene su ponajprije dimenzijama ispitnog uređaja, izbor je proveden na osnovu varijacija prema optimalnim brzinama klizanja na gonjenom i pogonskom zupčanicu. Za slučaj optimalnih brzina klizanja oba zupčanika, pomak profila iznosi $x_1 = 0,0849$ $x_2 = -0,0849$, pri čemu je za slučaj maksimalne podrezanosti većeg zupčanika pomak profila definiran s $x_1 = 0,2956$ $x_2 = -0,2956$, odnosno za slučaj maksimalne podrezanosti manjeg zupčanika pomak profila iznosi $x_1 = -0,2272$ $x_2 = 0,2272$. Treći je parametar promjena sadržaja vode, pri čemu su ostvarena po tri područja zasićenosti. Simulirana su dva krajnja stanja zasićenosti materijala, potpuna zasićenost materijala vodom (100 % rh) te minimalna zasićenost (0% rh), pri čemu je kao treće središnje stanje uzeto stanje približne zasićenosti od 50% vlage.

Provedbom ispitivanja na 36 različitih zupčanih parova uz provedenu analizu određene su granice nosivosti za područje brzina vrtnje od 1000 min^{-1} do 2100 min^{-1} . Zaključeno je da promjena mase tijekom rada ovisi od opterećenja i sadržaja vode u materijalu, da područje opterećenja iznad 20 Nm je moguće smatrati područjem ubrzanog trošenja pri brzini vrtnje od 1000 min^{-1} . Dugotrajnim izlaganjem zupčanika od poliamida okolini, s visokim postotkom vlage dolazi do smanjenja tvrdoće i smanjenja broja ostvarenih ciklusa. Opteretivost polimernih zupčanika koji rade u kombinaciji PA 6 / PA 6 ovisi od opterećenja i zasićenosti materijala vodom, dok pomak profila nema utjecaj na opteretivost. Radom zupčanika u zahvatu bez maziva dolazi do brzog

povišenja temperature u zahvatu. Dostizanjem srednje temperature boka zuba u iznosu od 115°C tijekom rada poliamidnih zupčanika dolazi do temperaturnog zaribavanja zupčanika, odnosno do taljenja materijala kojem prethodi područje povećanog trošenja na izlazu iz zahvata. Očekivanje srednje temperature koja se javljaju kod poliamidnih zupčanika na granici opteretivosti s zasićenošću materijala vodom od 50% iznose 86,16°C. Buka koja se stvara tijekom rada zupčanika ovisna je od narinutog opterećenja, stupanja zasićenosti vodom i pomaka profila. Generalno vrijedi da povećanjem sadržaja vode u materijalu dolazi do smanjenje buke tijekom rada. Povećanjem brzine vrtnje dolazi do pada granice nosivosti te je za ispitne zupčanike dobiven prevladavajući način zadovoljavanja radnog vijeka preko zaribavanja poradi povišene temperature.

Dobivenim zakonitostima iz ovog rada moguće je pouzdanije i točnije odrediti očekivanu temperaturu boka zuba u zahvatu te očekivani broj ciklusa zupčanika. Na osnovi izloženih zaključaka moguće je reći da je hipoteza ovog doktorskog rada potvrđena.

Prikazanim postupcima provedbe eksperimenata te prikazanim ispitnim uređajem dana je osnova za proširivanje istraživanja za druge kombinacije materijala u paru te proširivanje granica opteretivosti na širi raspon brzina. Proširivanje istraživanja buke prijenosnika posebice je interesantna primjenom različitih materijala u spregu pri različitim stanjima zasićenosti vodom.

-
- [1] M. Šerčer, B. Križan, R. Basan, *Konstruiranje polimernih proizvoda*. Zagreb, Croatia, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2009.
 - [2] ANSI/AGMA 920-A01, *Materials for Plastic Gears*. Alexandria, Virginia, American Gear Manufactures Association, 2000.
 - [3] ANSI/AGMA 909-A06, *Specifications for Molded Plastic Gears*. Alexandria, American Gear Manufactures Association, 2006.
 - [4] ISO 6336, *Calculation of Load Capacity of Spur and Helical Gears*. Geneva, Switzerland, ISO, 2006.
 - [5] B. Križan, R. Basan, *Polimerni konstrukcijski elementi*. Rijeka, Hrvatska, Zigo, Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2009.
 - [6] I. Čatić, *Proizvodnja polimernih tvorevina*. Zagreb, Hrvatska, Denona d.o.o., 2006.
 - [7] J. Rösler, "Zur Tragfähigkeitssteigerung thermoplastischer Zahnräder", Doktorski rad, Der Fakultät der Technischen Universität, Berlin, 2005.
 - [8] D. Petrov, K. Dearn, D. Walton, R. Banks, "Some Experimental Results Concerning The Influence of Surface Coating on The Wear of Poly Ether Ether Ketone (PEEK) Polymeric Gears", in *26-th International Scientific Conference 65 Years Faculty Of Machine Technology*, Sozopol, 2010.
 - [9] K. Mao, "The Performance of Dry Running Non-metalic Gears", Doktorski rad, School of Manufacturing and Mechanical Engineering The University of Birmingham, Birmingham, 1993.
 - [10] B. R. Suren, R. M. Douglas. (2009, August) Gears Tooth Temperature Measurements. [Online].
http://www.gearsolutions.com/media/uploads/assets/PDF/Articles/Aug_09/0809_Rao.pdf
 - [11] K. Mao, "A numerical method for polymer composite gear flash temperature prediction", *Wear*, Vol. 262, pp. 1321-1329, February 2007.
 - [12] H. Blok, "The flash temperature concept", *Wear*, Vol. 6, pp. 483-494, 1963.
 - [13] K. Mao, "A new approach for polymer composite gears design", *Wear*, Vol. 262, pp. 432-441, July 2007.
 - [14] K. Mao, W. Li, C. J. Hooke, D. Walton, "Polymer gear surface thermal wear and its performance prediction", *Tribology International*, Vol. 43, pp. 433-439, July 2010.
 - [15] BS 6168, *Non-metalic spur gears*. London, UK, British Standard Institution, 1987.
 - [16] S. N. Kukureka, Y. K. Chen, C. J. Hooke, P. Liao, "Surface failure mechanisms in polymer gears", in *Proceedings of the International Gearing Conference*, London, 1994, pp. 13-18.
 - [17] E. Oberšmit, *Ozubljenja i zupčanici*. Zagreb, Hrvatska, Sveučilišna naklada d.o.o., 1990.
 - [18] S. Senthilvelan, R. Gnanamoorthy, "Damage Mechanisms in Injection Molded Unreinforced,

- Glass and Carbon Reinforced Nylon 66 Spur Gears", *Applied Composite Materials*, Vol. 11, pp. 377-397, 2004.
- [19] A. R. Breeds, S. N. Kukureka, K. Mao, D. Walton, C. J. Hooke, "Wear behaviour of acetal gear pairs", *Wear*, Vol. 166, pp. 85-91, 1993.
- [20] K. Mao, W. Li, C. J. Hooke, D. Walton, "Friction and wear behaviour of acetal and nylon gears", *Wear*, Vol. 267, pp. 639-645, 2009.
- [21] R. Yakut, H. Düzcükoğlu, M. T. Demirci, "The load capacity of PC/ABS spur gears and investigation of gear damage", *Achievements in Mechanical and Materials Engineering*, Vol. 40, no. 1, pp. 41-46, November 2009.
- [22] R. Feulner, Z. Brocka, A. Seefried, M. G. Hülder, G. Kobes, T. A. Osswald, "The effects of e-beam irradiation induced cross linking on the friction and wear of polyamide 66 in sliding contact", *Wear*, Vol. 268, pp. 905-910, 2010.
- [23] J. Cayer Barrioz, D. Mazuyer, Ph. Kapsa, A. Chateauminois, G. Robert, "Abrasive wear micromechanisms of oriented polymers", *Polymer*, Vol. 45, pp. 2729-2736, 2004.
- [24] A. Marcellan, O. Bondil, C. Boue, A. Chateauminois, "Third body effects in the wear of polyamide: Micro-mechanisms and wear particles analysis", *Wear*, Vol. 266, pp. 1013-1020, 2009.
- [25] Y. Xing, G. Zhang, K. Ma, T. Chen, X. Zhao, "Study on the Friction and Wear Behaviors of Modified PA66 Composites", *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 48, no. 0360-2559, pp. 633-638, 2009.
- [26] J. H. Jia, H. D. Zhou, S. Q. Gao, J. M. Chen, "A comparative investigation of the friction and wear behavior of polyimide composites under dry sliding and water-lubricated condition", *Materials Science and Engineering*, Vol. A356, pp. 48-53, 2003.
- [27] V. Quaglini, P. Dubini, D. Ferroni, C. Poggi, "Influence of counterface roughness on friction properties of engineering plastics for bearing applications", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 1650-1658, 2009.
- [28] P. Samyn, J. Quintelier, G. Schoukens, "On the Repeatability of Friction and Wear Tests for Polyimides in a Hertzian Line Contact", *Experimental Mechanics*, Vol. 48, pp. 233-246, 2008.
- [29] C. G. Clarke, C. Allen, "The water lubricated, sliding wear behaviour of polymeric materials against steel", *Tribology International*, Vol. 24, pp. 109-118, April 1991.
- [30] D. Vlahović, *Termoplasti u strojogradnji*. Zagreb, Hrvatska, Metalurški kombinat Željezara Sisak, 1972.
- [31] Đ. Španiček, *Utjecaj medija na deformacijsko ponašanje poliamida 6*. Zagreb, Doktorska disertacija, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, 1994.
- [32] R. L. Fusaro, "Polimide film Wear - Effect of Temperature and Atmosphere", Lewis Research Center, National Aeronautical and Space Administration, Cleveland, Ohio, NASA TN D-8231, 1976.
- [33] Energizing Chemistry LanXESS. (2005, May) Moisture absorption in Durethan Polyamide Parts. [Online]. http://techcenter.lanxess.com/scp/americas/en/docguard/PIB_Durethan_Moisture_Absorption.pdf?docId=76987

- [34] Energizing Chemistry LanXESS. (2005, May) Conditioning of Parts made from Durethan Polyamide Resin. [Online]. http://techcenter.lanxess.com/scp/americas/en/docguard/PIB_Durethan_Conditioning_of_Parts.pdf?docId=76990
- [35] P. E. Bretz, R. W. Hertzberg, J. A. Manson, "Fatigue crack propagation in crystalline polymers: effect of moisture in nylon 66", *Journal of Materials Science*, Vol. 14, pp. 2482-2492, 1979.
- [36] D. Walton, A. B. Cropper, D. J. Weale, Klein P. Meuleman, "The efficiency and friction of plastic cylindrical gears Part 1: Influence of materials", *Journal of Engineering in Medicine*, Vol. 216, no. 2, pp. 75-92, 2002.
- [37] D. Walton, A. B. Cropper, D. J. Weale, Klein P. Meuleman, "The efficiency and friction of plastic cylindrical gears Part 2: Influence of tooth geometry", *Journal of Engineering in Medicine*, Vol. 216, no. 2, pp. 93-103, 2002.
- [38] S. Senthilvelan, R. Gnanamoorthy, "Effect of rotational speed on the performance of unreinforced and glass fiber reinforced Nylon 6 spur gears", *Materials & Design*, Vol. 28, no. 3, pp. 765-772, 2007.
- [39] S. Kirupasankar, C. Gurunathan, R. Gurunathan, "Transmission efficiency of polyamide nanocomposite spur gears", *Materials & Design*, Vol. 39, pp. 338-343, March 2012.
- [40] ISO 53, *Cylindrical gears for general and heavy engineering - Standard basic rack tooth profile.*, 1998.
- [41] S. Senthilvelan, R. Gnanamoorthy, "Effect of gear tooth fillet radius on the performance of injection molded nylon 6/6 gears", *Materials and Design*, Vol. 27, pp. 632-639, 2006.
- [42] H. Düzcükog̃lu, "PA 66 spur gear durability improvement with tooth width modification", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 1060-1067, 2009.
- [43] H. İmrek, "Performance improvement method for Nylon 6 spur gears", *Tribology International*, Vol. 42, pp. 503-510, 2009.
- [44] H. C. Kim, "Durability improvement method for plastic spur gears", *Tribology International*, Vol. 39, pp. 1454-1461, 2006.
- [45] Harold van Melick, "Tooth-Bending Effects in Plastic Spur Gears", *Gear Technology*, pp. 58-66, September / October 2007.
- [46] H. Van Melick, HK. Van Dijk, "High - Temperature Testing of Stanyl Plastic Gears: A comparasion with Tensile Fatigue Data", *Geat Technology*, pp. 59-65, March / April 2010.
- [47] S. Senthilvelan, R. Gnanamoorthy, "Influence of reinforcement on composite gear metrology", *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 43, pp. 1198-1209, 2008.
- [48] S. Senthilvelan, R. Gnanamoorthy, "Fiber Reinforcement in Injection Molded Nylon 6/6 Spur Gears", *Appl Compos Mater*, Vol. 13, pp. 237-249, 2006.
- [49] A. Bernasconi, F. Cosmi, D. Dreossi, "Local anisotropy analysis of injection moulded fibre reinforced polymer composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 68, no. 12, pp. 2574-2581, 2008.
- [50] O. Zöllner. (2012, Studeni) Bayer AG. [Online]. <https://plastics.bayer.com/>
- [51] M. N. Mehat, S. Kamaruddin, R. A. Othman, "Reducing the Shrinkage in Plastic Injection

- Moulded Gear via Grey Optimization Method", in *Proceedings of the World Congress on Engineering WCE*, Vol. 3, London, 2012.
- [52] Y. Hao, X. Zhu, C. Hai, "Research of Quality Control for Plastic Injection gear based on CAE technology.", in *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)*, Wuhan, 2010, pp. 3742 - 3747.
- [53] D. Zdenković, "Sistematizacija izvora, vrsti i štetnosti buke u mehaničkim prijenosnicima snage", Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1988.
- [54] S. Senthilvelan, R. Gnanamoorthy, "Condition Monitoring Of Nylon And Glass Filled Nylon Gears", in *11th National Conference on Machines and Mechanisms*, New Delhi, 2003, pp. 278-282.
- [55] S. Senthilvelan, R. Gnanamoorthy, "Damping characteristics of unreinforced, glass and carbon fiber reinforced nylon 6/6 spur gears", *Polymer Testing*, Vol. 25, pp. 56-62, September 2006.
- [56] E. Gunter, *Designing with Plastics*. Munich, Germany, Hanser Publisher, 2006.
- [57] K. D. Dearn, D. Walton, "Acoustic Emissions from Polymeric Gears", in *Proceedings of the World Congress on Engineering WCE*, Vol. II, London, 2009, pp. 1832-1837.
- [58] J. Nozawa, T. Komoto, T. Kawai, H. Kumehara, "Tribological properties of polymer-sheet-adhered metal hybrid gear", *Wear*, Vol. 266, pp. 893-897, 2009.
- [59] T. J. Hoskins, K. D. Dearn, S. N. Kukureka, D. Walton, "Acoustic noise from polymer gears – A tribological investigation", *Materials & Design*, Vol. 32, no. 6, pp. 3509-3515, 2011.
- [60] T. Kovačić, *Struktura i svojstva polimera*, Ivka Klarić, Branka Andričić, Jasenka Jelenčić, Eds. Split, Hrvatska, Udžbenici Sveučilišta u Splitu, 2010.
- [61] L. W. McKeen, *The effect of temperature and other factors on plastics and elastomers*, 2nd ed. Norwich, NY / USA, William Andrew Inc., 2008.
- [62] I. Alfiredić, *Mehanika kontinuuma*. Zagreb, Golden marketing, 2003.
- [63] HRN M.C1.030, *Cilindrični evolventni zupčasti parovi - Definicije odstupanja.*, 1967.
- [64] DIN 3961, *Tolerances for Cylindrical Gear Teeth - Bases*. Berlin, 1978.
- [65] DIN 3962, *Tolerances for Cylindrical Gear Teeth - Tolerances for Deviations of Individual Parameters*. Berlin, 1978.
- [66] DIN 3967, *Backlash Tooth Thickness Allowances Tooth Thickness Tolerances - Principles*. Berlin, 1978.
- [67] B. Obsieger, *Prijenosi sa zupčanicima*, II ed. Rijeka, Hrvatska, Zigo- Rijeka, 2003.
- [68] DIN 3964, *Deviations of Shaft Centre Distances and Shaft Position Tolerances of Casings for Cylindrical Gears*. Berlin, 1980.
- [69] S. Kashyap, "Development of a procedure to describe plastic gear geometry after a temperature change with application to the prediction of gear load distribution", Doktorski rad, The Ohio State University, Ohio, 2011.
- [70] HRN EN ISO 62, *Određivanje apsorpcije vode (ISO 62:2008 EN ISO 62:2008) Plastics - Determination of water absorption (ISO 62:2008 EN ISO 62:2008)*. Brussels, CEN, 2008.
- [71] A. B. Cropper, "The Failure Mode Analysis Of Plastic Gears", Doktorski rad, The University

- of Birmingham, Birmingham, 2003.
- [72] M. Opalić, *Prijenosnici snage i gibanja*, I ed. Zagreb, Hrvatska, Gradska tiskara Osijek, 1998.
- [73] B. Križan, "Prilog istraživanju gubitaka trenja u zahvatu evolventnih zupčanika", Doktorski rad, RITEH, Rijeka, 1990.
- [74] K. Vučković, "Nastanak zamorne pukotine u korijenu zuba zupčanika s tankim vijencem", Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [75] DIN 3972, *Reference Profiles of Gear-cutting tools for Involute Tooth System according to DIN 867*. Berlin, 1952.
- [76] Advanced Motion Controls. Product Resource Center. [Online]. <http://www.a-m-c.com>,.Travanj.2013
- [77] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH HBM. Data Acquisition Systems. [Online]. <http://www.hbm.com/en/menu/products/measurement-electronics-software/specialized-data-acquisition-systems/spider8/>,.Travanj.2013
- [78] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH HBM. Data Acquisition Software. [Online]. <http://www.hbm.com/en/menu/products/software/data-acquisition-software/>,.Travanj.2013
- [79] Advanced Motion Controls. Drive Ware. [Online]. <http://www.a-m-c.com/products/driveware.html>,.Travanj.2013
- [80] FUTEK Advanced Sensor Technology. Torque Sensors. [Online]. <http://www.futek.com/product.aspx?t=torque&m=trs600>,.Travanj.2013
- [81] J. Deur, "Vektorsko upravljanje sinkronim motorom s permanentnim magnetima u širokom rasponu brzina vrtnje", *Automatika*, Vol. 36, pp. 27-33, 1995.
- [82] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*. Berlin, Germany, Springer-Verlag, 2001.
- [83] T. Staroveški, "Modeliranje trošenja medicinskog svrdla", Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [84] Hottinger Baldwin Messtechnik HBM, "Rotary Vibration Transducer BD", Operating manual, Hottinger Baldwin Messtechnik, Damstadt,.
- [85] Optris GmbH. (2013, Travanj) Compact Series - optris CT P7. [Online]. <http://www.optris.com/optris-ct-p7>
- [86] AGMA 299.01, *Sound manual Part I - Fundamentals of Sound as related to gears*. Alexandria, Virginija, American Gear Manufacturers Association, 1989.
- [87] AGMA 297.01, *Sound of Enclosed Helical Herringbone, and Spiral Bevel Gear Drives*. Arlington, Virginia, American Gear Manufacturers Association, 1983.
- [88] Delta OHM. (2013, Travanj) Acoustic Vibrations. [Online]. http://www.deltaohm.com/ver2010/uk/st_acustica.php?str=HD8701
- [89] M. Runjić-Sokele, "Utjecaj parametara razvlačnog puhanja na svojstva PET boca", *Polimeri*, Vol. 28, no. 4, pp. 213-292, 2007.
- [90] H. Cajner, "Višekriterijsko adaptivno oblikovanje planova pokusa", Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [91] Zell-Metall. (2013, Srpanj) Technical Properties Of Zellamid. [Online]. http://www.zellamid.com/technical_properties_zellamid_10-2007%20%284%29.pdf

- [92] HRN EN ISO 868:2008, *Plastika i guma (ebonit) – Određivanje utisne tvrdoće pomoću durometra (Tvrdoća prema Shoreu) (ISO 868:2003; EN ISO 868:2003) (Plastics and ebonite - Determination of indentation hardness by means of a durometer Shore hardness)*., 2003.
- [93] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, 5th ed. New York, John Wiley & Sons, 2000.

Zoran Domitran rođen je 11. studenog 1980. godine u Zagrebu, Republika Hrvatska. Osnovnu školu završio je u Svetom Ivanu Zelini, a srednju tehničku školu *"Faust Vrančić"* u Zagrebu. Godine 1999. upisuje studij strojarstva na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu, usmjerenje *"Strojarske konstrukcije"* gdje diplomira 2002. godine, te dobiva nagradu za istaknuti uspjeh na studiju.

Dodiplomski studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (FSB), upisao je 2002. godine u Zagrebu, te diplomirao 2007. godine na smjeru *"Konstrukcije"*, usmjerenja *"Strojarske konstrukcije"*. Dobitnik je rektorove nagrade za 2007. godinu s radom *"Konstrukcija uređaja za grubo usitnjavanje otpadaka od duromernih kompozita"*. Za vrijeme studija bio je demonstrator pri Zavodu za konstruiranje na Katedri za elemente strojareva i konstrukcija.

Od 2008. godine zaposlen je na Katedri za elemente strojeva i konstrukcija pri Zavodu za konstruiranje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, u svojstvu znanstvenog novaka. Upisuje poslijediplomski studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, smjer *"Teorija konstrukcija"*, te aktivno sudjeluje u nastavi iz kolegija Konstrukcijski elementi robota, Elementi konstrukcija I i II. Tijekom poslijediplomskog studija sudjeluje na tehnologijskom projektu (TP-07-0125-52) *Solarna sušara voća i povrća sa predobradom ultrazvukom*, FP7 projektu *High Altitude Wind Energy* (HAWE), te FP7 projektu *UNCOSS* (EU, FP7-SEC-2007-1) Konstrukcija podvodnog plovila za istraživanje zaostalih eksplozivnih sredstava. Dobitnik je stipendije *ERASMUS* za Republiku Sloveniju 2009. Godine, te boravi šest mjeseci na Strojarskom fakultetu, Sveučilišta u Mariboru, kao istraživač.

Znanstvenim radom bavi se u sklopu projekta, broj 120-1201833-1832 *"Ekološki podržan razvoj proizvoda"* Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske. Kao autor ili koautor, objavio je 5 znanstvenih radova.

Govori i piše engleskim jezikom te je dugogodišnji aktivan član kluba padobranskog jedrenja (*e. paragliding*) "Let" iz Ivanca.

Short Biography

Zoran Domitran was born on November 11th, 1980 in Zagreb, Croatia where he attended elementary and high technical school "Faust Vrančić".

In 1999 he enrolled in the Polytechnic of Zagreb and undergraduated in 2002 majoring in Mechanical Design course. He was awarded for distinctive accomplishments during his study. In 2002 he enrolled in the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture (FSB), University of Zagreb and graduated in 2007 majoring in Engineering Design course. In 2007 he received Rector's award for the design of grinding machine for thermoset based composite materials. During the study he was student assistant at Engineering Design Department.

Since 2007 he has been employed as junior researcher and teaching assistant at the Department of Design, Chair of Machine Elements and Design of FSB, and enrolled in the postgraduate study in the Theory of Structures and Design course. He is actively involved in several courses.

During postgraduate study he participated in the scientific project Environmentally Supported Product Development (120-1201833-1832), several technological projects financed by the Ministry of Science, Education and Sport, as well as following FP7 projects: High Altitude Wind Energy (HAWE) and UNCOSS (EU, FP7-SEC-2007-1).

In 2009 he won ERASMUS scholarship and spent 6 months as researcher in the Faculty of Mechanical Engineering in Maribor, Slovenia.

His research interest is generally in the field of engineering design. He has published as author or co-author 5 scientific and professional papers in journals and conference proceedings. He is fluent in English, and is an active member of the paragliding club "Let".